

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie - 345

## **Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarového spoje oceli T24**

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie - 345

## **Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarového spoje oceli T24**

## **Influence of heat treatment on mechanical properties of T24 steel**

Student:

Jaroslav Tomeček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2009

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Tomeček**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**  
Specializace: **70 Strojírenská technologie**  
Téma: **Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarového spoje oceli T24**  
**Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties of T24 Steel**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii, týkající se moderních nízkolegovaných žárovevných ocelí s důrazem na jejich svařitelnost
2. Zpracujte rešerši o metodě svařování 141
3. Navrhněte a zaznamenejte technologii svařování trubek z oceli T24
4. Proved'te tepelné zpracování svarových spojů oceli T24
5. Proved'te měření tvrdosti a metalografii na jednotlivých svarových spojkch
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky

Seznam doporučené odborné literatury:

Kolektiv autorů: *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: ZEROSS Ostrava, 2001  
MOHYLA, P. *Změny mechanických vlastností CrMoV svarových spojů při dlouhodobé teplotní expozici v podcreepové oblasti*. [Doktorská disertační práce]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2000.  
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. Ostrava: VŠB – TUO Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0870-6

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009



  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 22. 5. 2009

Jaroslav Tomeček  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 22. 5. 2009

Jaroslav Tomeček  
podpis studenta

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

TOMEČEK, J. Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svarového spoje oceli T24. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, počet stránek( 60 s.). Bakalářská práce, vedoucí Ing. Petr Mohyla, Ph.D..

Bakalářská práce pojednává o vlivu tepelného zpracování nově vyvinuté nízkolegované žárupevné oceli T24 po svařování. Tato ocel má hlavní využití v tepelné energetice. Používá se na kotlové trubky, membránové stěny a potrubní komponenty. Ocel byla vyvinuta pro ultra-super- kritické parametry páry (nad 600 °C, nad 300 bar).

Ocel se bude v rámci experimentu svařovat metodou 141. Jedná se o svařování netavící se elektrodou v ochranném inertním plynu. Tato metoda je vhodná pro svařování nízkolegovaných ocelí. Po svaření bude na polovině vzorků provedeno tepelné zpracování. Poté budou vzorky podrobeny destruktivním zkouškám a to konkrétně zkouška tvrdosti a metalografická zkouška.

Cílem práce je určení vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti svaru za pokojové teploty, které souvisejí s odolností při tečení. Teoretickým předpokladem je, že velikost teploty tepelného zpracování po svařování zásadně ovlivňuje výsledné vlastnosti svarového spoje.

## **ANNOTATION OF THESIS**

TOMEČEK, J. Influence of heat treatment on mechanical properties of T24 steel. Ostrava: department mechanical technology, fakulty mechanical engineering VSB – Technical University Ostrava, 2008. pages (60) Bachelor's thesis, tutor Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

The bachelor's thesis deals with the influence of heat treatment on newly developed, low-alloy, refractory steel T24 after welding.

This steel is mainly used in the thermal energy industry. It is used for boiler pipes, membrane partitions and tubular components. The steel was developed for ultra-super-critical parameters of steam (over 600 °C, over 300 bar).

The steel will be welded by the method 141. This evolves welding with a non-melting electrode in a protective inert gas. The method is suitable for welding low-alloy steels. The heat treatment will be conducted on half of the samples, after the welding. Afterwards the samples will be subjected to destructive tests, specifically the test of hardness and the metallographic test.

The aim of the bachelor's thesis is to determinate the influence of heat treatment on the mechanical proprieties of a weld at the room temperature, which relates to the resistance while creep. The theoretic presumption is that the temperature of heat treatment radically influences the final properties of a weld.

# OBSAH

## Seznam použitého značení

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>2</b>	<b>Moderní nízkolegované žárupevné oceli a jejich svařitelnost.....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1	Použití ocelí T/P23 a T/P24, jejich zatřídění do norem .....	- 11 -
2.2	Přídavný materiál pro moderní žárupevné oceli .....	- 12 -
2.3	Svařitelnost moderních nízkolegovaných ocelí.....	- 14 -
2.4	Tepelné zpracování nízkolegovaných žárupevných ocelí.....	- 16 -
2.5	Tepelné zpracování moderních nízkolegovaných žárupevných ocelí.....	- 17 -
2.6	Zkušenosti se svařováním moderních žárupevných ocelí .....	- 19 -
2.6.1	Ocel T/P24.....	- 19 -
2.6.2	Ocel T/P23.....	- 20 -
2.7	Žárupevnost moderních nízkolegovaných žárupevných ocelí .....	- 21 -
<b>3</b>	<b>Metoda svařování 141 (TIG) .....</b>	<b>- 24 -</b>
3.1	Elektrický obvod a polarita při svařování .....	- 24 -
3.1.1	Elektrický oblouk .....	- 25 -
3.2	Svařovací zařízení .....	- 27 -
3.2.1	Láhve pro stlačený plyn .....	- 27 -
3.2.2	Redukční ventily .....	- 28 -
3.2.3	Vodiče a hadice pro svařování .....	- 29 -
3.2.4	Zdroje pro svařování a jejich charakteristiky .....	- 29 -
3.3	Svařovací hořáky.....	- 30 -
3.4	Netavící se elektrody .....	- 32 -
<b>4</b>	<b>Metodika experimentálních prací.....</b>	<b>- 34 -</b>
4.1	Návrh technologického postupu pro trubičky z materiálu T24.....	- 38 -
<b>5</b>	<b>Tepelné zpracování svarových spojů oceli T24 .....</b>	<b>- 45 -</b>
5.1	Určení teploty přehřevu:.....	- 45 -
5.2	Dohřev .....	- 46 -
5.3	Popouštění .....	- 46 -
<b>6</b>	<b>Metalografie svarového spoje oceli T24 .....</b>	<b>- 48 -</b>
6.1	Odběr vzorků.....	- 48 -
6.2	Příprava vzorků .....	- 48 -
<b>7</b>	<b>Měření tvrdosti svarového spoje T24 .....</b>	<b>- 50 -</b>
<b>8</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>- 53 -</b>
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>- 54 -</b>
	<b>Poděkování.....</b>	<b>- 55 -</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>- 56 -</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>- 57 -</b>

## Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
A	ampér	
A <sub>C1</sub>	teplota solidu	[ °C ]
A <sub>5</sub>	tažnost	[ % ]
ARA	anizotermický rozpad austenitu	
CET	uhlíkový ekvivalent	[ % ]
e	tloušťka stěny	[ mm ]
G	označení trubkového závitu	[ palce ]
HB	tvrdost podle Brinela	
HV10	tvrdost podle Vickerse, zatížení 10 kg	
h	značka hodiny	
I	proud	[ A ]
IRA	izotermický rozpad austenitu	
k	koeficient tepelné účinnosti metody svařování	
KCV	vrubová houževnatost	[ J.cm <sup>-2</sup> ]
MAG	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu	
MIG	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním ochranném plynu	
MPa	megapascal, jednotka napětí	
Ms	počátek martenzitické přeměny	
MW	Megawatt, jednotka výkonu	
P	výkon	[ J ]
p	tlak	[ bar ]
P <sub>CM</sub>	uhlíkový ekvivalent	[ % ]
P <sub>W</sub>	parametr praskavosti	[ % ]
Q	tepelný příkon	[ kJ. mm <sup>-1</sup> ]
R <sub>e</sub>	mez kluzu	[ MPa ]
R <sub>m</sub>	mez pevnosti	[ MPa ]
R <sub>p0,2</sub>	smluvní mez kluzu	[ MPa ]
SK	svarový kov	
T	teplota	[ °C ]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
T <sub>p</sub>	teplota přehřevu	[ °C ]
TR	trubka	
TZ	tepelné zpracování	



U	napětí	[ V ]
v	rychlost svařování	[m/min]
W	označení Whitwordova závitů	[ palce ]
ZM	základní materiál	
111	označení ručního obloukového svařování obalenou elektrodou (SMAW)	
121	označení obloukového svařování pod tavidlem (SAW)	
Ø	průměr	[mm]



## **1 Úvod**

Tepelné zpracování svarových spojů se provádí pro zlepšení výsledných vlastností spojů. Druh tepelného zpracování se volí podle materiálu, požadovaných užitných vlastností svarového spoje. U nízkolegovaných materiálů po svařování obvykle následuje tepelné zpracování.

Nízkolegované žárupevné oceli se po svařování obvykle popouštějí, to slouží ke snížení zbytkových napětí a také k obnovení degradované struktury. Popouštění nízkolegovaných ocelí se pohybuje od 680 do 750°C. Teplota popouštění má zásadní vliv na vyprecipitování vytvrzujících fází v průběhu popouštění. To má významný vliv na mechanické vlastnosti ocelí, přičemž je omezen vznik sekundárního vytvrzení při pracovních teplotách.

Pro moderní nízkolegovanou ocel T24, která má dle normy ČSN EN 10216 také označení 7CrMoVTiB10-10, volba teploty tepelného zpracování není zcela jednoznačná. Problematika určení teploty spočívá v tom, že tento materiál by měl po svaření vykazovat jak vysokou žárupevnost, tak i houževnatost a v neposlední řadě i odolnost proti tečení.

Tento problém je aktuální, jelikož se odborníci neshodují v tom, zda je nutno po svaření oceli T24 použít tepelného zpracování. Proto je snahou této práce dokázat, že popouštění po svařování ocele T24 je potřebné, a to v doporučeném rozmezí teplot 750°C až 760°C.

## 2 Moderní nízkolegované žárupevné oceli a jejich svařitelnost

Ekonomické tlaky a náklady na ochranu životního prostředí vedou ke stavbě nových energetických zařízení k výrobě elektrické energie. Tyto zařízení se vracejí k využití energie z fosilních zdrojů, a to i přes snahu a pokrok ve využívání alternativních zdrojů [1].

Hlavním činitelem zvýšení efektivnějšího využití je zvýšení parametrů páry a to teploty a tlaku. Hodnotám těchto parametrů se říká ultra - super - kritické parametry. Díky tomuto požadavku bylo zapotřebí vyvinout nové materiály, které jsou schopny pracovat při ultra – super – kritických parametrech. Konvenční oceli jako např. 13CrMo4-4 nebo 10CrMo9-10 nemají dostatečnou žárupevnost. Hlavní problém je odolnost vůči vysokoteplotní korozi a mez pevnosti při tečení. Proto byly v 90. letech vyvinuty nové žárupevné nízkolegované oceli. V Japonsku to byla ocel T/P23, v Německu ve firmě Vallourec & Mannesman pak ocel T/P24. Tyto oceli se používají pro trubky membránových stěn, membránové trubice, ale díky jejich vynikajícím žárupevným vlastnostem se uvažuje rozšířenější použití. Základnou pro obě tyto oceli byla známá ocel 10CrMo9-10 (T/P22). Přilegováním prvků jako V, Nb, Ti, které vytvářejí speciální karbidy, se silně zvýšila mez pevnosti tečení. U ocele T/P23 byl ještě přidán prvek wolfram se současnou redukcí obsahu molybdenu [2].

Tabulka 1: Chemické složení žárupevných ocelí T/P22, T/P23 a T/P24 [3]

	T/P22	T/P23	T/P24
C	max. 0,15	0,04 – 0,10	0,05 – 0,10
Si	0,25 – 1,0	Max. 0,50	0,15 – 0,45
Mn	0,30 - 0,60	0,10 – 0,60	0,30 – 0,70
P	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,020
S	max. 0,030	max. 0,010	max. 0,010
Ni	–	–	–
Cr	1,90 – 2,60	1,90 – 2,60	2,20 – 2,60
Mo	0,87 – 1,13	0,05 – 0,30	0,90 – 1,10
W	–	1,45 – 1,75	–
Ti	–	–	0,05 – 0,10
V	–	0,20 – 0,30	0,20 – 0,30
Nb	–	0,02 – 0,08	–
Al	–	max. 0,030	max. 0,020
N	–	max. 0,030	max. 0,012
B	–	0,0005 – 0,0060	0,0015 – 0,0070

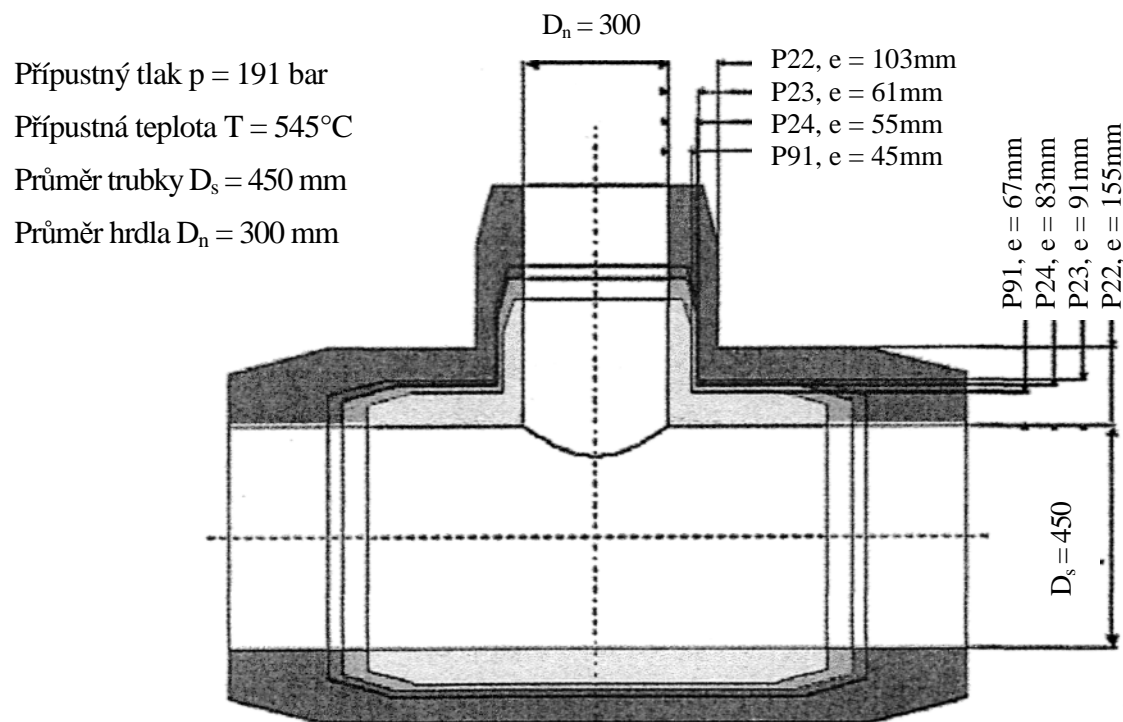
Tabulka 2: Mechanické hodnoty ocelí T/P22, T/P23 a T/P24 [3]

	R <sub>p0,2</sub>	Re [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Tvrdość [HB]
T/P22	280	205	415	Min. 30	163
T/P23	400	400	510	Min. 20	220
T/P24	450	450	585	Min. 20	250

Zvláštností u obou ocelí je snížení obsahu uhlíku, což má vliv na průběh křivek u ARA i IRA – diagramu. Toto snížení uhlíku se projeví tím, že při velmi rychlém ochlazení v martenzitickém stupni dosahuje tvrdość pouze hodnoty od 350 do 360 HV10. Další výhodou sníženého obsahu uhlíku je samozřejmě svařitelnost. Tento jev se zdá být výhodou, jelikož je možno u slabostěnných oblastí kotlů se silou stěny menší než 10 mm neprovádět tepelné zpracování. Je možno obě oceli v zušlechtěném stavu použít, normalizační žíhání zpravidla probíhá při teplotě  $1060^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  pro ocel T/P23, pro ocel T/P24 při teplotách  $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Dále pak teplota pro popouštění u ocele T/P23 je  $760^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ , pro ocel T/P24 je to teplota  $750^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ . Pro silnostěnné součástky z těchto ocelí je nezbytně nutné zušlechtění ve vodní lázni z důvodu zajištění vysokých hodnot vrubové houževnatosti. Také pevnostní parametry ocelí T/P23 a T/P24 výrazně vyšší. Tyto oceli projevují dobrou zpracovatelnost podobnou oceli T/P22. [2].

## 2.1 Použití ocelí T/P23 a T/P24, jejich zařídění do norem

Nová elektrárenská zařízení, která mají hodnoty ostré páry nad teplotu  $585^{\circ}\text{C}$ , jsou hlavním zařízením pro použití moderních žárupevných ocelí. Použití nových ocelí je nezbytné díky vyhovění zvýšeným požadavkům, které vyplývají ze zvýšených teplot. Hlavní použití ocelí T/P23 a T/P24 je v úseku membránových stěn. U silnostěnných komponentů lze pak tyto oceli použít dále pro sběrač kotle, potrubní systém v teplotním rozsahu mezi  $500^{\circ}\text{C}$  až  $550^{\circ}\text{C}$ . Díky tomu vykazují výraznou aplikační přednost před klasickou trubkovou ocelí T/P22. Hodnoty meze pevnosti ocelí T/P23 a T/P24 vykazují hodnoty, které mohou být překonány jen novými martenzitickými ocelmi jako P91, E911, P92. Aplikační předností je tloušťka stěny potrubí, oproti oceli T/P22 jsou rozměry komponentů téměř poloviční. Na obrázku 1 je porovnání tlouštěk různých materiálů. Výpočty, které to dokazují, byly aplikovány pro 350 MW blok, jež byl dimenzován dle ASME B31.1 původně pro ocel T/P22.



Obr. 1 Porovnání tloušťek materiálů [4]

Ocel T/P23 je v dnešní době znormována v ASTM A 213 a ASTM A 335. Pro ocel T/P24 se připravuje příslušný Code Case. Pod označením 7CrMoVTiB10-10 neboli T/P24 je předloženo stanovení způsobilosti ve formě VdTUV- materiálového listu 533 [2]. Ocel T24 je uvedena i v normě ČSN EN 10216.

## 2.2 Přídavný materiál pro moderní žárovevné oceli

Při výběru přídavného materiálu je hlavním faktorem chemické složení. Mechanické vlastnosti svarového kovu musí být velmi podobné základnímu materiálu. Při výběru přídavného materiálu pro nízkoaligované žárovevné oceli pracující při vysokých teplotách v oblasti tečení by měl svarový kov mít podobnou mez pevnosti při tečení jako základní materiál. Jestliže je možné nebezpečí oxidace nebo koroze, pak korozní a oxidační vlastnosti svarového kovu musí být co nejvíce podobné hodnotám základního materiálu. Vzhledem k vysoké citlivosti nízkoaligovaných ocelí na vodíkové praskání, je nutno volit nízkovodíkové elektrody. Pokud svařujeme stejné oceli, procento Cr a Mo by mělo být ve svarovém kovu nižší než požadované hodnoty, to platí i pro pevnost. Svařujeme-li různorodé oceli pak může mít svarový kov nižší, stejné nebo vyšší procento legur než má základní materiál. Je vhodné volit menší průměry přídavného materiálu z důvodu omezení tepelného příkonu [5]. Přídavný materiál je k dispozici v podobě elektrody pro ruční svařování, drátu pro svařování metodou TIG a drát pro svařování metodou 121. Hlavním výrobcem přídavných materiálů pro moderní

nízkolegované žárupevné oceli je firma Böehler Thyssen. Tato firma je v dnešní době nejdále s výzkumem přídavných materiálů [1]. Správná volba přídavného materiálu zásadně ovlivňuje vlastnosti svarového spoje. Vhodný přídavný materiál může ovlivnit i volby teploty přehřevu [6]. Příklady přídavných materiálů pro moderní nízkolegované oceli jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 3. Příklad přídavných materiálů pro ocel T/P23 a jejich chemické složení (%) [4].

	Pro metodu WIG Union I P23	Pro metodu 111 Thermanit P23	Pro metodu 121 Union S P23
C	0,08	0,06	0,05
Si	0,27	0,22	0,27
Mn	0,54	0,46	0,94
Cr	2,14	2,28	2,04
Ni	0,04	0,12	0,09
Mo	0,08	0,02	0,11
V	0,21	0,28	0,18
W	1,58	1,72	1,61
Nb	0,031	0,043	0,043
N	0,011	0,017	0,007
B	0,002	0,002	< 0,001

Tabulka 4. Mechanické hodnoty přídavných materiálů [4].

	Union I P23	Thermanit P23	Union S P23
R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	520	509	615
R <sub>m</sub> [MPa]	620	625	702
A <sub>5</sub> [%]	20,2	19	18,1
Tvrdost [HV10]	270	227	237

Tabulka 5: Příklad přídavných materiálů pro ocel T/P24 a jejich chemické složení [4].

	Pro metodu WIG Union I P24	Pro metodu 111 Thermanit P24	Pro metodu 121 Union S P24
C	0,061	0,090	0,050
Si	0,23	0,27	0,20
Mn	0,49	0,54	0,72
Cr	2,29	2,53	2,26
Mo	1,0	1,03	0,98
V	0,24	0,22	0,22
N	0,014	0,013	0,009
B	0,0020	0,0030	0,0010
Ti/Nb	0,041	0,046	0,027

Tabulka 6. Mechanické hodnoty přídavných materiálů [4].

	Union I P24	Thermanit P24	Union S P24
R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	595	577	495
R <sub>m</sub> [MPa]	699	689	600
A [%]	20,3	18,1	23,8
Tvrdost [HV10]	230	233	206

## 2.3 Svařitelnost moderních nízkolegovaných ocelí

**Svařitelnost** materiálu je schopnost vytvořit ze dvou částí nerozebíratelný celek některým způsobem tavného, tlakového nebo jiného svařování. Obtížná svařitelnost materiálu se projevuje málo pevným svarem nebo křehnutím materiálu v okolí svaru. Svařitelnost zkoušíme mnoha způsoby:

Zkoušení sklonu k **trhlinám za tepla a studena** a hodnocení trhlin vznikajících při tuhnutí představují ve smyslu svařitelnosti klíčovou roli, a to jak při různých skupinách materiálu tak i při různých způsobech svařování [7].



Obecně, nízkolegované oceli mají vyšší mez pevnosti, vyšší mez kluzu a také žárupevnost než oceli uhlíkové. Žáropevné oceli jsou schopny pracovat ve vyšších teplotách, moderní nízkolegované žáropevné oceli posouvají hranici teplot ještě výše. Prvky jako, Cr, Mo, V jsou hlavní legující prvky, u nových ocelí ještě navíc Nb, Ti, N.

Procentuelně tyto hlavní legující prvky nepřekročí hodnotu 5 %. Hlavním prvkem, který slouží k dokonalé desoxidaci je Al.

Vysoké hodnoty mechanických vlastností zajišťuje hlavně:

- Zpevnění tuhého roztoku
- Precipitační zpevnění
- Dislokační zpevnění
- Jemnozrnná struktura

Proces zpevnění tuhého roztoku je dán obsahem C, Mn, a Mo. Precipitační zpevnění se dosahuje díky precipitaci karbidů chromu, molybdenu, vanadu, niobu, titanu a nitridů vanadu. Na velikosti, počtu a střední vzájemné vzdálenosti vytvrzujících fází je závislá velikost precipitačního zpevnění, mechanické vlastnosti a žárupevnost. Je-li dáno chemické složení, pak tepelné zpracování určuje disperzi precipitátů. Proto polotovary pro konstrukce svařenců jsou dodávány normalizované a popuštěné, nebo kalené a popuštěné. Popouštění je aplikováno z důvodu dosažení optimální disperze vytvrzujících částic a optimálního poměru pevnostních a plastických vlastností. Ve svarových spojích je náchylnost na vznik studených vodíkem indukovaných trhlin způsobena vyšším podílem martenzitu nebo spodního bainitu. Tento jev je způsoben rostoucím obsahem prvků jako C, Mn, Cr, Mo a Ni. Tyto prvky způsobují snížení kritické rychlosti pro dosažení martenzitu v ARA diagramu. Jak ve svarovém kovu, tak i v TOO. V průběhu svařování nízkolegovaných ocelí je zásadou použití přehřevu, u větších tloušťek pak i dohřev.

Tepelné zpracování u nízkolegovaných ocelí je zastoupeno obvykle popouštěním. Při popouštění nízkolegovaných ocelí je nutné dodržovat maximální rychlosti ohřevu a maximální povolené rychlosti ochlazování při popouštění, jinak hrozí vznik žíhacích trhlin. Další riziko žíhacích trhlin je v obsahu legur a rostoucí tloušťkou žíhaných svarových spojů. Největší ovlivnění z legujících prvků na žíhací trhliny má Cr [7].

Velká část ocelí je při svařování náchylná na vznik studených trhlin. Všeobecně se uvádí za příčinu vzniku těchto trhlin tři faktory:

- přítomnost vodíku ve svarovém spoji
- přítomnost struktury citlivé na účinky vodíku
- přítomnost tahových zbytkových pnutí[7]

Praktické zamezení vzniku trhlin za studena je možné:

1. snížením obsahu difuzního vodíku jeho kontrolováním, výběrem vhodné technologie svařování a přídavných materiálů
2. použít vhodné technologie svařování, parametrů svařování, **teplotního režimu svařování**, které vylučují transformaci zkřehnutí v oblasti svarového spoje a umožňují lepší difuzi ze svarového spoje[7].

Ze všech možností je nejreálnější a nejčastější se používá druhá možnost. Jedná se o optimalizaci rychlosti ochlazování teplem ovlivněné oblasti tak, abychom potlačili případně omezili vznik tvrdé a křehké struktury (martenzit, bainit), podpořili uvolňování vodíku a docílili nízké úrovně zbytkových pnutí. Nejčastější používanou možností je **předehřev**, resp **dohřev**. Kontrola teplotního režimu svařování [7].

**Předehřev** lze definovat jako teplotu, na kterou jsou ohřáté svařované součásti resp. Jejich dostatečně velké oblasti v místě budoucího svaru, bezprostředně před zhotovením první housenky nebo vrstvy svaru[7].

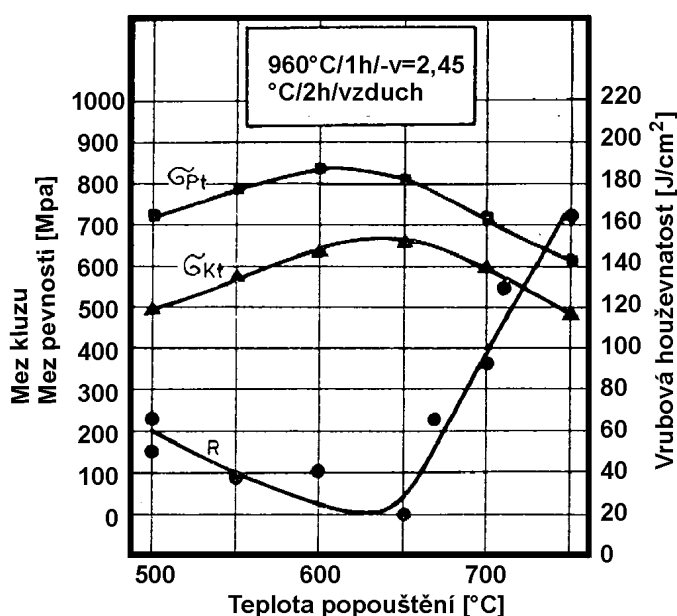
Vlastní **stanovení** příslušné **teploty předehřevu** je možné experimentálně zkouškami praskavosti (např. Tekken, CTS, atd.), ale je možné stanovit teplotu předehřevu přímo využitím výpočtových algoritmů, které byly odvozeny pro určitý soubor základních materiálů[7].

## **2.4 Tepelné zpracování nízkolegovaných žárupevných ocelí**

Svarové spoje nízkolegovaných ocelí se po svaření obvykle pouze popouštějí. Účelem popouštění je snížení zbytkových napětí a zlepšit strukturu svarového spoje. Popouštění způsobuje dosažení optimálního poměru mezi pevnostními a plastickými vlastnostmi svarového spoje. Teplota popouštění se volí dostatečně vysoká, aby vytvrzující fáze vyprecipitovaly převážně v průběhu popouštění, což má zabránit tzv. sekundárnímu vytvrzování při provozu[13].

Sekundární vytvrzování způsobuje zvýšení tvrdosti a snížení plastických vlastností svarového spoje. S rostoucí popouštěcí teplotou se zvyšují plastické vlastnosti svarových spojů. Na obr. 2 je vidět, jak teplota popouštění může ovlivnit výsledné mechanické

vlastnosti svarového spoje. Jestliže zvolíme nízkou teplotu popouštění, dosáhneme sice vysokých hodnot meze kluzu při tečení a meze pevnosti při tečení, ovšem na úkor vrubové houževnatosti. Proto se teploty popouštění u většiny svarových spojů nízkolegovaných ocelí pohybují v rozsahu 650 až 750°C. Doporučená doba výdrže na popouštěcí teplotě je 4 minuty na 1mm tloušťky svarového spoje [13].



Obr. 2: Vliv teploty popouštění na mechanické vlastnosti CrMoV oceli [8]

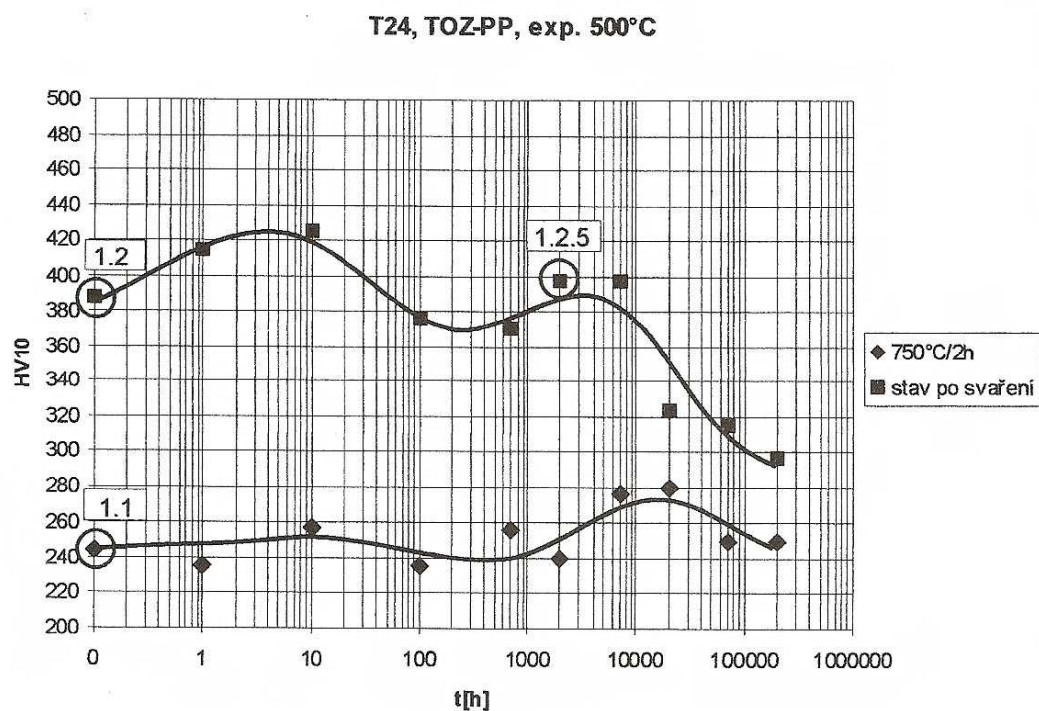
## 2.5 Tepelné zpracování moderních nízkolegovaných žárupevných ocelí

Tepelné zpracování v podobě popouštění má pro mechanické vlastnosti svarového spoje moderní nízkolegované žárupevné oceli T 24 velký vliv. Tento vliv je popsán v práci [9]. V této práci bylo provedeno simulované stárnutí na svarových spojkách oceli T 24. Svarové spoje byly zhotoveny metodou 111 s přídavným materiálem v podobě elektrody Thyssen Chromo3V. Jedna skupina spojů byla popuštěna při teplotě 750 °C, druhá skupina byla ponechána bez tepelného zpracování. Poté byl na těchto vzorcích simulován provoz při teplotě 500 °C. Po simulovaném provozu následovaly zkoušky tvrdosti, vrubové houževnatosti[9].

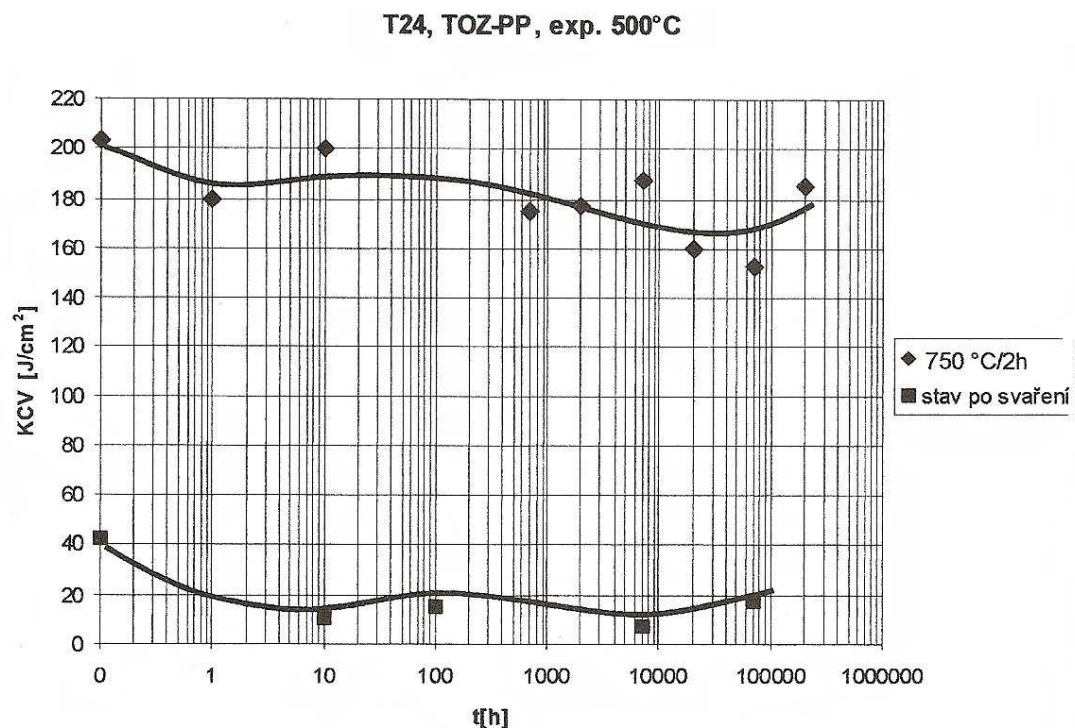
Na obrázku 3 můžeme pozorovat průběh tvrdosti během simulovaného provozu. Z těchto křivek je patrný sklon k vytvrzování v krátkém čase. Na rozdíl od spoje popuštěného, ten vykazuje mnohem vyrovnanější průběh. [9]

Vliv popouštění na vrubovou houževnatost KCV můžeme pozorovat na obrázku 4. Naměřené hodnoty v tomto grafu poukazují na výraznou ztrátu plasticity u spoje bez

tepelného zpracování. Hodnoty u popuštěného spoje se pohybují kolem hodnoty  $180 \text{ J.cm}^{-2}$  v oblasti TOO. Nepopuštěný stav udává velmi nízké hodnoty KCV, pouze kolem  $20 \text{ J.cm}^{-2}$  v tom samém místě.[9]



Obr. 3 Průběh tvrdosti v pásmu přehřátí TOZ, ocel T23, provozní teplota 500 °C [9]



Obr. 4 Průběh vrubové houževnatosti pásma přehřátí TOO u oceli T24 při provozní teplotě 500°C [9]

## 2.6 Zkušenosti se svařováním moderních žárovevných ocelí

### 2.6.1 Ocel T/P24

Tato nová žárovevná nízkolegovaná ocel již prošla několika experimenty. Její svařitelnost byla zkoumána na spojích se stejným základním materiálem, tak i na spojení materiálu T24 a T91. Ocel T91 je 9-12% Cr martenzitická ocel. Problematika svařitelnosti u homogenních spojů ocele T24 je uvedena v práci [6]. Výsledkem této práce je, že přídavný materiál a velikost teploty předehřevu může hlavním způsobem ovlivnit výsledek svařování. Další práce [9] se zabývá problémem, zda je nutné zařazení tepelného zpracování po svařování ocele T24. U tohoto problému se dospělo k závěru, že při simulovaném provozu na vzorcích bez použití tepelného zpracování dochází k sekundárnímu vytvrzení. Při použití tepelného zpracování v podobě popouštění k tomuto sekundárnímu vytvrzení nedochází. Tento jev má spojitost s vrubovou houževnatostí a také s tvrdostí svarového spoje. Proto pro spolehlivý provoz zařízení z materiálu T24 je vhodné použití jak předehřevu tak i popouštění. Z výsledků této práce plynou doporučení pro materiály T23 a T24:

Pro tenkostěnný materiál (tloušťka svařence menší než 15 mm)

- Minimální teplota předehřevu 150 °C
- Teplota žhání 750 °C až 760 °C [9]

Pro silnostěnný materiál (tloušťka svařence větší než 15 mm)

- Teplota předehřevu 200 °C až 250 °C
- Teplota žhání 750 °C až 760 °C [9]

Otázka svařitelnosti materiálu T24 s jiným materiálem byla zkoumána v práci [2]. Tato práce pojednává o provedení svaru ocelí T24 a T23 s martenzitickými ocelmi používanými taktéž v energetice. Metodou WIG byly zhotoveny svary následujících ocelí: T23/T91, T24/T91, P23/P92. Po zhotovení těchto svarů byly provedeny zkoušky. Zkoušky mechanických hodnot byly provedeny tahem napříč při pokojové teplotě a při teplotě 500 °C. Ukázalo se, že k přetržení došlo v základním materiálu při dosažení specifických minimálních hodnot pevnosti základních materiálů T23, T24 a P23. Při použití přídavného materiálu pro nízkolegované oceli byly dosaženy nejvyšší hodnoty houževnatosti. Jestliže použijeme přídavný materiál druhově stejný k materiálům P92 a P23 vykazuje vyšší pevnost než základní materiál P23. To vede k vyvození toho, že neexistuje významné oduhličení, které by mělo vliv na pevnostní chování v oblasti spojů v blízkosti hranice ztavení. Zkoušky metalografické zkoumaly zejména oblasti blízko tavných linií s ohledem na oduhličení a

nauhličení. Metalografie ukázala, že významně neklesá tvrdost v blízkosti tavných linií svarového materiálu a TOO pod tvrdost základního materiálu. V druhově stejných svařovacích materiálech k T/P23, T24 a P92 karbidotvorné prvky zamezují silné difúzi uhlíku [2].

### **2.6.2 Ocel T/P23**

U této ocele byl proveden zkušební program kolektivem autorů v práci [1]. Experiment probíhal na dvou vzorcích v podobě potrubí (P 23) a trubičky (T 23). U obou vzorků se jednalo o homogenní spoje [1].

Vzorek v podobě potrubí měl rozměr D 219 x 25 mm. Přídavný materiál byl Thermanit P23. Svarové spoje u potrubí byly zhotoveny kombinací metod GTAW(141) a SMAW(111). Teplota předehřevu na začátku při stehování svarových spojů byla 180 – 250 °C, po dobu 30 minut před začátkem svařování. V průběhu svařování byla teplota předehřevu v rozmezí 200 – 250 °C, mezihousenková teplota nepřekročila teplotu 300 °C. Chladnutí svarů po svaření probíhalo na vzduchu. Bezprostředně po svaření bylo provedeno žíhání na snížení vnitřního pnutí. Rychlost ohřevu na žíhací teplotu byla 80 – 120 °C bez mezivýdrže. Výška žíhací teploty byla zvolena jako kompromis teploty žíhání potřebné k dodržení požadované houževnatosti a žárupevnosti. S ohledem na relativně protichůdné požadavky byla teplota žíhání zvolena 750 – 760 °C. Doba výdrže byla zvolena na základě tloušťky a to 2 hodiny. Rychlost ochlazování byla 100 – 150 °C, poté následovalo ochlazení na vzduchu [1].

Zkoušky svarů byly jak destruktivní tak nedestruktivní. Rozsah zkoušek přihlížel na požadavky norem, jiných standardů a vlastní zkušenosti. Vizuelní prohlídkou byly zkontrolovány povrchové vady, bylo vyhověno stupni hodnocení B. Magnetickou zkouškou se nepotvrdily povrchové ani podpovrchové vady. Destruktivní zkoušky byly: zkouška houževnatosti, zkouška tvrdosti, zkouška lámavosti, metalografický rozbor a zkoušky žárupevnosti. Zkoušky žárupevnosti jsou podrobněji uvedeny v další části [1].

U vzorků v podobě trubičky o parametrech D 42,2 x 3,6 mm byly svarové spoje provedeny automatem, metodou TIG. Přídavný materiál byl použit drát D 1,0 mm Union I P23. Vynechání předehřevu bylo díky zkušenostem autorů a z důvodu zproduktivnění svařování přehříváčů v praxi. Co se týká žíhání, nebylo provedeno. Výsledky zkoušek byly následující : hodnoty tvrdosti naměřené v TOO a svarovém kovu byly maximální a to v rozmezí 297 až 309 HV10. Přičemž limitující hodnota tvrdosti pro nežíhaný stav je hodnota 350. Pevnost svarového spoje kontrolována tahovou zkouškou vykazovala hodnoty 620, 652

MPa, požadavkem pro základní materiál je hodnota 510 MPa. Plastické vlastnosti byly prověřeny zkouškou lámavosti jak ze strany kořene, tak ze strany krycích vrstev na úhel 180°, v obou případech spoje nevykazovaly známky porušení. Na dalších zkouškách se bude pracovat [1].

Doporučení autorů do praxe pro:

Silnostěnný materiál:

- Svařovat v teplotním režimu pod čarou Ms
- Přísně limitovaný tepelný příkon
- Žíhání provádět v rozmezí teplot 730 – 740°C při minimální výdrž 60 minut.
- Tepelné zpracování provádět s pomalým náběhem a ochlazováním z žíhací teploty [1]

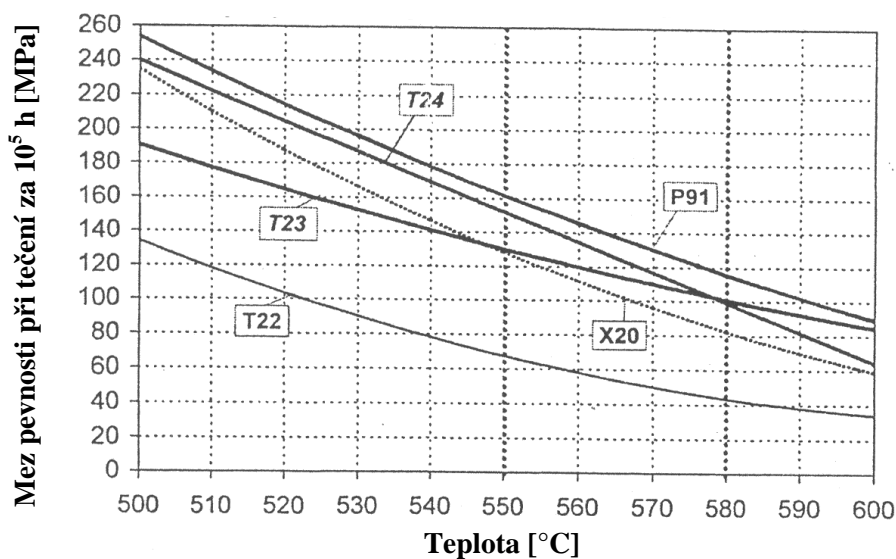
Tenkostěnný materiál:

- Vynechání předehřevu z hlediska produktivity svařování trubiček přehřívačů
- Vynechání žíhání po svařování z důvodu vyhovujících zkoušek tvrdosti [1]

Zkoušky byly provedeny okamžitě po svaření, bez provedení dlouhodobé expozice. To má za následek doporučení vynechání žíhání [1]. Jestliže nepoužijeme žíhání po svařování, potom sekundární vytvrzení způsobí zvýšení tvrdosti a ztrátu houževnatosti čímž může dojít k destrukci svarového spoje. Při použití žíhání se tento jev odbourá a tím je spolehlivost spoje zásadně zvýšena. Proto je zařazení žíhání jednoznačně nezbytné [6].

## **2.7 Žárupevnost moderních nízkolegovaných žárovevných ocelí**

U žárupevných ocelí je mez pevnosti v tečení považována za nejvíce směrodatný parametr. Na obrázku 5 jsou znázorněny odlišnosti meze pevnosti v tečení moderních žárupevných ocelí od konvenčních žárupevných ocelí. Hodnoty ocelí T/P23 a T/P24 se nacházejí poněkud hlouběji než hodnoty ocele T/P91 ale výrazně nad hodnotami ocele T/P22, což je ocel která je vývojovou základnou těchto ocelí. Křivky pevnosti při tečení ocelí T/P23 a T/P24 se protínají v okolí teploty 580 °C a při teplotě 600 °C se křivka oceli T/P23 blíží k oceli T/P91. Díky omezené žárupevnosti způsobené nízkým obsahem chromu se nedoporučuje obě moderní oceli používat nad teplotu 575 °C [2].



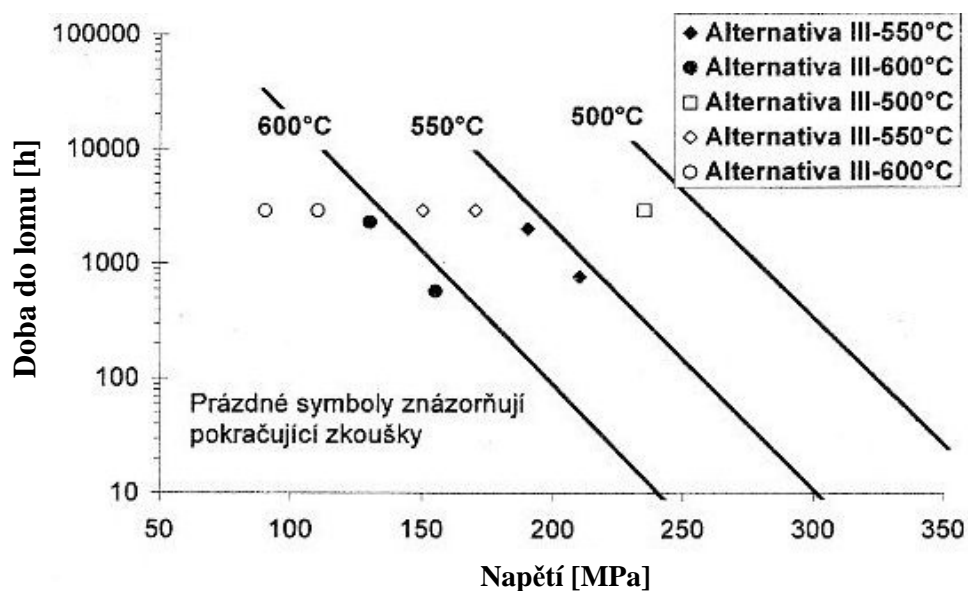
Obr. 5 Porovnání meze pevnosti ( $R_{mT}$ ) ocelí T/P23 a T/P24 s dalšími žárupevnými ocelmi [10]

Žárupevnost svarových spojů žárupevných ocelí T/P23 a T/P24 je však ohrožena tzv. sekundárním vytvrzováním. Tento jev způsobují disperzní částice MX, které se vyznačují vysokou rozměrovou stabilitou v oblasti tečení. Přítomností disperze těchto částic dochází k ovlivnění plastických vlastností. Jestliže nejsou svarové spoje popouštěny dochází k vytvrzení po krátké době asi 2000 h, což může vést k úplnému porušení svarového spoje, díky tomu nemůže být využito vylepšené žárupevnosti ocelí T/P23 a T/P24. Použijeme-li po svařování popouštění, dojde k vytvrzení při popouštění. Použití popouštění má velký vliv na provozní spolehlivost a s tím související využití žárupevnosti moderních ocelí [9].

Zkouškami žárupevnosti ocele T/P23 se zabývala práce [1]. Zkoušky probíhaly na homogenních svarových spojích. Vzorky byly v podobě tyčí o parametrech D 219 x 25 mm. Byly zkoumány 3 alternativy parametrů žíhání po svařování. V prvním případě byl rozsah teplot 750°C až 760°C/2h. Druhý způsob byl s těmito parametry 740°C až 750°C/2h. Třetí pak 730°C až 740°C. Zkoušky byly vykonány s těmito parametry teploty 500, 550 a 600°C a napětí 320 – 105 MPa. Pro porovnání vlivu teploty žíhání svarových spojů na pevnost při tečení byl použit diagram žárupevnosti základního materiálu. U první alternativy představovaly hodnoty doby do lomu při zkoušce tečení asi jednu desetinu hodnot základního materiálu. U druhé alternativy výsledky ukázaly mírně vyšší žárupevnost, ale i přesto není možné je považovat za vyhovující. Proto bylo rozhodnuto tento předpoklad potvrdit snížením teploty žíhání a zkrácením doby výdrže. Třetí alternativa potvrdila předpoklady o možném dosažení vyhovujícího času do lomu při daných zkušebních parametrech. Výsledky v tomto případě byly nejlepší.



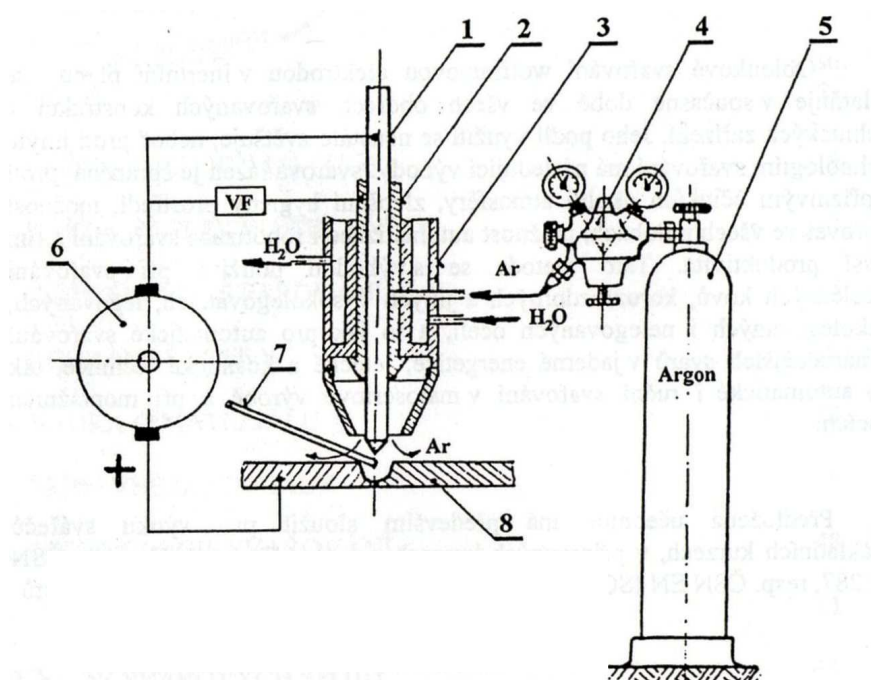
Tyto výsledky ležely v přípustném pásmu, což je hodnota žárupevnosti o 20 % nižší než u základního materiálu. Na obrázku 6 jsou znázorněny výsledky zkoušky žárupevnosti pro třetí alternativu[1] .



Obr. 6 Výsledky zkoušky žárupevnosti u svarového spoje ocele P23, žitáno dle 3 alternativy[1]

### 3 Metoda svařování 141 (TIG)

Tato metoda je jedním z druhů obloukového svařování. Principem je vznik a hoření elektrického oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem (Obr. 7). Elektroda, nejbližší okolí a svarová lázeň jsou chráněny ochranným inertním plynem argonem. Ochrana je potřebná z důvodu nepříznivého účinku okolní atmosféry na svařování. Hlavní nebezpečí představuje kyslík a dusík z atmosféry. Označování této metody je dle ČSN EN 24 063: TIG pro anglosaské země, WIG pro německé země a GTAW pro americké země. [11]



1 – wolframová elektroda
2 – kleština elektrody
3 – těleso svařovacího proudu
4 – redukční ventil
5 – láhev s ochranným plynem

6 – zdroj svařovacího proudu
7 – přídavný svařovací materiál
8 – základní materiál

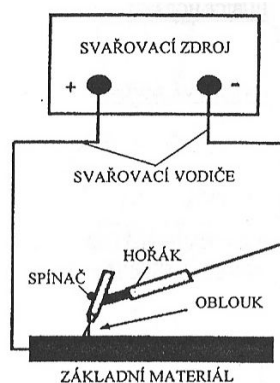
Obr. 7 Schéma metody TIG [11]

#### 3.1 Elektrický obvod a polarita při svařování

Elektrický obvod při svařování je jednoduchý. Skládá se ze zdroje napětí, proměnlivého odporu a spínače. Proměnlivý odpor představuje hořák TIG s netavící se elektrodou, základní materiál, elektrický oblouk a propojovací vodiče. Elektrický proud protéká svařovacím obvodem jen v čase, kdy je spínač zapnutý a hoří oblouk. To znamená, že je obvod uzavřený. Svařovací vodiče nesmí mít porušenou izolaci. Průřez vodiče musí odpovídat maximálnímu

proudovému zatížení zdroje. Polarita určuje způsob zapojení vodičů. Polarita je závislá na základním materiálu, způsobu svařování a přídavném materiálu. U stejnosměrného zdroje se polarita v závislosti na čase nemění a je označena na výstupních svorkách (+) a (-). U střídavého zdroje se svorky neoznačují díky tomu, že se polarita mění (za sekundu 50 x). U stejnosměrných zdrojů je třeba kontrolovat polaritu[11].

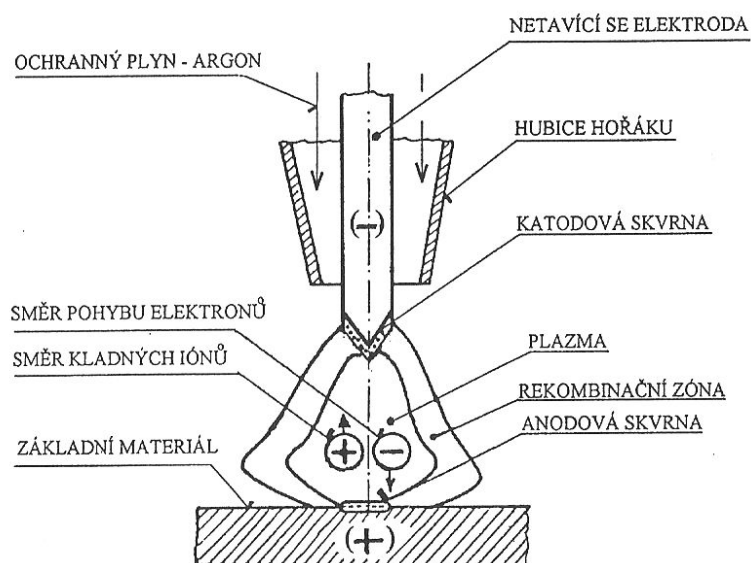
Schéma svařovacího obvodu je na obr .8.



Obr. 8 Svařovací oblouk pro metodu TIG [11]

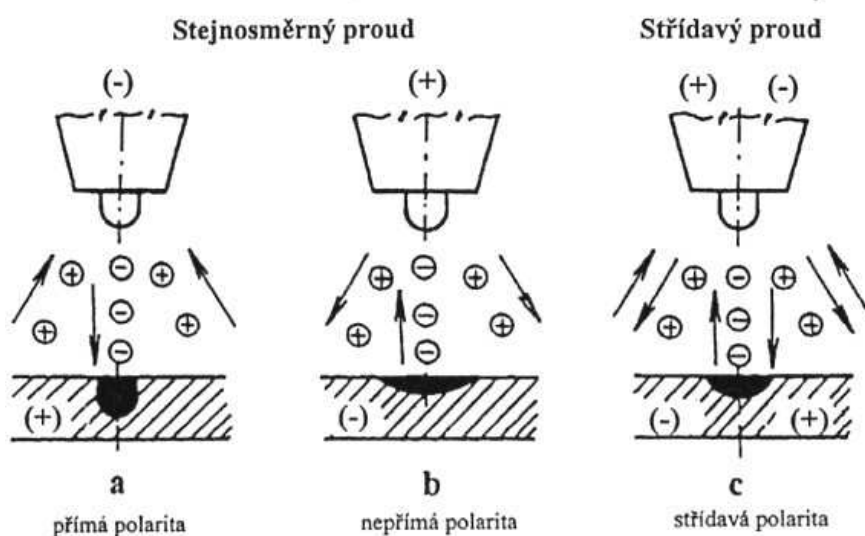
### 3.1.1 Elektrický oblouk

Je trvalý elektrický výboj ve vodivém prostředí mezi katodou a anodou. Podmínka pro vznik elektrického oblouku je elektrický proud větší než 0,3 A a tlak plynu, postačuje atmosférický tlak. Projevem elektrického oblouku je intenzivní záření a vysoká teplota. Teplota elektrického oblouku je 6 000 až 10 000°C, záření je ultrafialové, viditelné, infračervené. Elektrický oblouk je popsán na obr. 9.



Obr. 9 Popis elektrického oblouku u metody TIG [11]

Vnitřní oblast plazmy a vnější oblast rekombinace tvoří elektrický oblouk. Plazma se vyznačuje intenzivním zářením, poklesem elektrického napětí a vysokou teplotou. Vysoká teplota plazmy způsobuje nárazy elektronů nebo kladných iontů na kladné a záporné ionty což způsobuje ionizaci. Přenos elektrického proudu je díky tomu, že anoda a katoda přitahují kladně a záporně nabitě částice. Pojem rekombinace znamená, že díky nižší teplotě na okraji sloupce elektrického oblouku dochází ke slučování kladných a záporných iontů na atomy. Teplo uvolněné na základním materiálu je hlavní příčinou místního natavení kovů. Množství uvolněného tepla závisí na polaritě základního materiálu. Změnou polarity můžeme měnit tepelný účinek oblouku. U stejnosměrného proudu je polarita buď přímá, nebo nepřímá. Při přímé polaritě je svařovací hořák zapojen na (-) pól a základní materiál na (+) pól. Při tomto zapojení má svar malou šířku a velkou hloubku průvaru (obr.10a). U nepřímé polarity je hořák zapojen na (+) pól a základní materiál na (-) pól. Svar má pak velkou šířku a malou hloubku průvaru (obr.10b). Při svařování střídavým proudem se šířka a hloubka svaru se pohybuje v rozmezí hodnot uvedených způsobu zapojení. (obr.10c) [11].



*Obr.10 Tvar a rozměry svaru při různých polaritách [11]*

Výhodou svařovacího oblouku u metody TIG je schopnost odstranění povrchových oxidů na svařovaném materiálu. Jedná se o fyzikální děj, nazývaný čistící účinek oblouku dochází k němu pouze při zapojení na nepřímou nebo střídavou polaritu. Tento účinek se využívá při svařování materiálů, které vytvářejí na povrchu vrstvu vysokoteplotně tavitelných oxidů. Materiály, které tyto oxidy vytvářejí, jsou hliník, hořčík a jejich slitiny.

Existují dva druhy zapalování oblouku:

- *dotykově* – dotykem elektrody s povrchem svařovaného materiálu, následuje rychlé oddálení na malou vzdálenost, jde o zkratové zapálení
- *bezdotykově* – vysokým napětím s vysokou frekvencí, zdrojem je vysokofrekvenční ionizátor, ionizuje se plyn a poté dojde k zapálení

Aby nedošlo k znehodnocení wolframové elektrody, a následnému vzniku wolframových vměstků používá se bezdotykového zapalování.

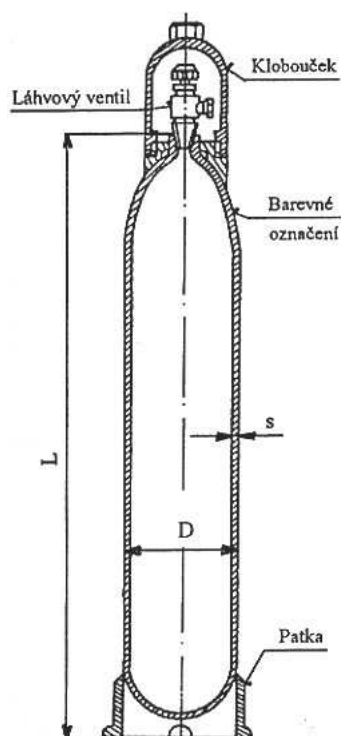
Působením magnetických silových polí může dojít k tzv. foukání oblouku. Tento jev může vzniknout u metody TIG díky: deformaci magnetického pole na okrajích svaru, dlouhým obloukem, přítomností feromagnetického materiálu, průvarem atd. Foukání může způsobit např.: vznik studených trhlin, vzniku zápalů, neprovaření kořene. Je možné zamezit foukání oblouku a to: změnou sklonu hořáku, zmenšením délky oblouku, zvýšením stability oblouku či pravidelným rozmístěním stehů. [11]

## **3.2 Svařovací zařízení**

### **3.2.1 Láhve pro stlačený plyn**

Jedná se o tlakové nádoby (Obr. 11) splňující normu ČSN 07 8305, která platí pro konstrukci, výrobu, zkoušení a značení tlakových nádob určených k dopravě plynů. Láhve jsou válcového tvaru vyrobené z oceli. Ve spodní části mají patku, horní část se zužuje do hrdla s vnitřním závitem pro lahvový ventil. Hrdlový kroužek má na vnějšku závit pro ochranný klobouček. Lahve označené proužkem nebo celé v barvě kávově hnědé slouží pro inertní plyny jako je argon, helium. V oblasti barevného značení je uveden celý název plynu, plnicí a zkušební tlak. Dle ČSN EN 1089-3 platí souběžně i nové značení láhví na stlačené plyny nebo směsi plynů. Láhve pro inertní plyny mají objem od 0,5 do 50 litrů. Pro metodu TIG se používají láhve s objemem 40 až 50 litrů. Plnicí přetlak je 15 až 20 MPa.

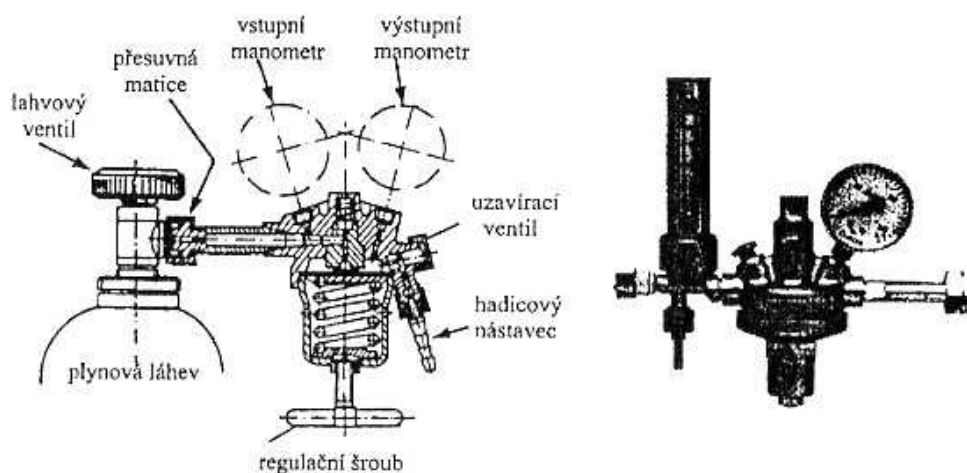
K účelu plnění, odběru a na připojení redukčního ventilu slouží lahvový ventil. Boční závitová přípojka je určena k připojení redukčního ventilu, z důvodu záměny je pro každý druh plynu jiného rozměru. U inertních plynů je to rozměr G 3/4“ [11].



Obr. 11 Tlaková láhev [11]

### 3.2.2 Redukční ventily

Jedná se o zařízení sloužící ke snížení tlaku plynu z láhve na pracovní tlak. Redukční ventil udržuje nastavený tlak a zajišťuje tím pravidelné průtokné množství plynu pro svařování TIG (Obr. 12).



Obr. 12 Vlevo je redukční ventil jednostupňový, v pravo ventil s průtokoměrem [11]

Na lahvový ventil se připojuje redukční ventil pomocí přesuvné matice, která má pravý závit (W21,8). Ventil se skládá ze dvou částí, z vysokotlaké a nízkotlaké části. Obě části jsou propojené škrtícím ventilem. V obou částech je tlakoměr, jeden na měření tlaku

plynu v láhvi a druhý na měření odebíraného plynu. U některých ventilů je místo tlakoměru na výstupu průtokoměr.

Průtokoměr na výstupu měří průtočné množství v litrech za minutu ( $\text{l/min}^{-1}$ ). Pootočením regulačního šroubu můžeme nastavit požadované množství odebíraného plynu [11].

### **3.2.3 Vodiče a hadice pro svařování**

Svařovací vodiče jsou propojeny se zdrojem pomocí bajonetových přípojek a ke svarku svorkou. Potřebná délka vodiče svařovacího proudu by měla být co nejkratší, také musí mít potřebný průřez jádra pro používaný rozsah svařovacího proudu. Materiál, kterým se přivádí proud do ručního hořáku je měď. Měděný vodič se nachází uvnitř hadice, kterou také proudí chladicí kapalina. Pro přívod chladicí kapaliny a inertního plynu se používají hadice vyrobené z teflonu nebo silikonu. Díky těmto materiálům jsou hadice lehké a ohebné.

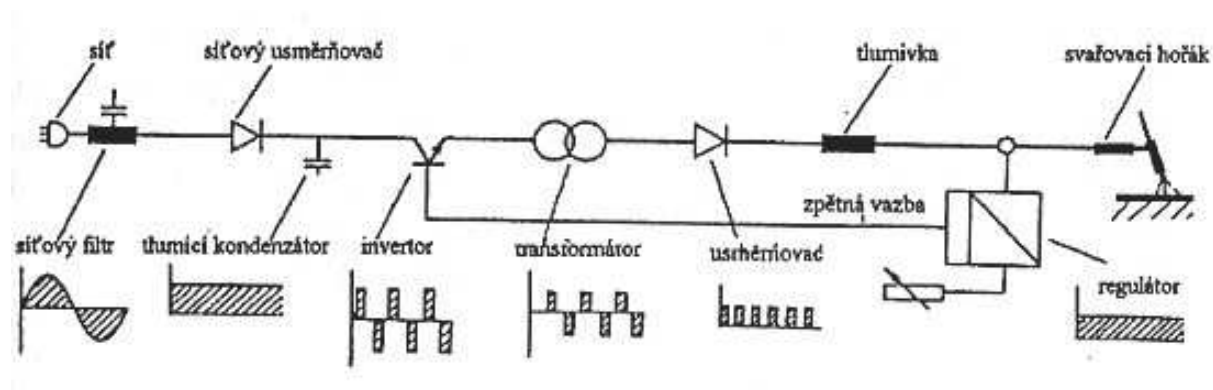
Ruční hořáky pro TIG svařování mají nejčastěji hadice s vnitřním průměrem 4 mm a tloušťkou stěny 1mm. Z hlediska bezpečnosti se doporučuje co nejmenší počet přípojek a spojek hadic. S tímto je spojeno hlavně zabezpečení proti rozpojení a pravidelná kontrola těsnosti [11].

### **3.2.4 Zdroje pro svařování a jejich charakteristiky**

Zařízení dodávající proud a napětí do uzavřeného svařovacího obvodu se nazývají svařovací zdroje. V dnešní době se nejčastěji pro svařování TIG používají svařovací a inventory.

#### **Příklady svařovacích zdrojů:**

Inventor – moderní střídačový zdroj, malé hmotnosti s výbornými svařovacími charakteristikami. V tomto zařízení je mikroprocesor, který umožňuje řízení svařovacích parametrů. Prvky inventoru mají základní funkce jako: síťový filtr, síťový usměrňovač, tlumicí kondenzátory. Inventor je schopen dodávat jak záporné tak kladné složky proudu o vysoké frekvenci. To umožňuje rovnoměrné využití síťového napětí s možností snížení hmotnosti až o 80 %. Schéma inventoru je na obr. 13.



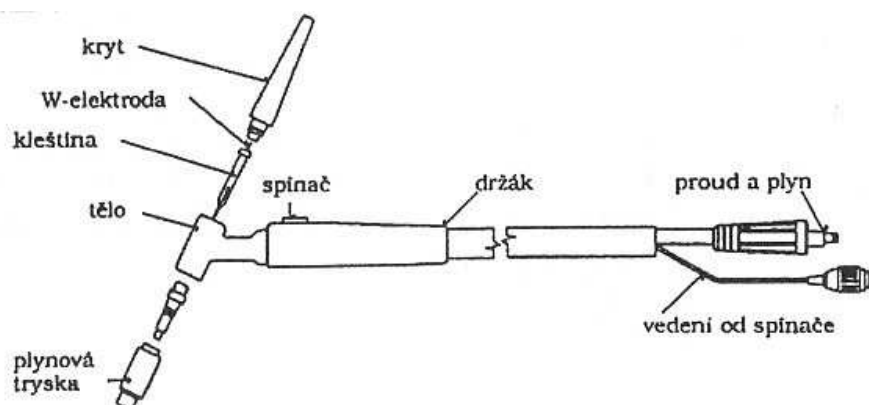
Obr. 13 Inventor [11]

Hlavní výhody inventoru jsou malé rozměry, velká stabilita oblouku, možnost řízení vneseného tepla v malém rozmezí atd. Samozřejmě inventory mají i nevýhody, hlavním je vysoká pořizovací cena, velké namáhání tranzistorového taktování atd.

Jejich hlavní využití je při svařování tenkých plechů, svařování materiálů citlivých na přehřátí, svařování kořene svarů trubek u vícevrstvých svarů [11].

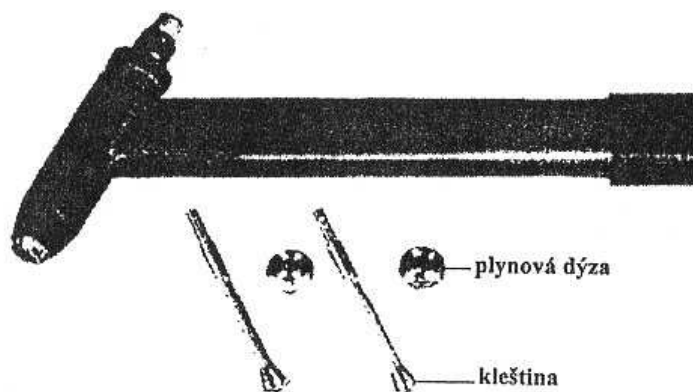
### 3.3 Svařovací hořáky

Pro metodu TIG používáme hořáky, jejichž velikost a konstrukce je dána v závislosti na zatěžovacím proudu. Je-li hořák určen pro menší hodnoty proudu, asi do 100 A, pak jsou držáky chlazené vzduchem, respektive inertním plynem. Pro větší hodnoty proudu jsou hořáky chlazeny kapalinou v podobě vody. Pro hořáky chlazené vzduchem (obr.14) se používají keramické plynové trysky. Pro výkonnější hořáky vodou chlazené (obr. 15) se používají trysky kovové a to buď měděné, nebo pochromované.



Obr. 14 Vzduchem chlazený hořák [11]





Obr. 15 Vodou chlazený hořák [11]

Kleština je součástí svařovacích hořáků. Kleština slouží k zabezpečení přívodu svařovacího proudu a fixuje polohu elektrody v hořáku. Je velmi tepelně namáhána. Další součástí hořáku, která je rovněž tepelně namáhána je dýza neboli hubice. Jejím úkolem je usměrnění inertního plynu do místa svaru a proto musí mít vhodný průměr a tvar. Vnitřní průměr hubice ovlivňuje velikost svařovacího proudu. Průměry dýz jsou v tabulce 7.

Tabulka 7. Doporučené průměry dýz dle velikosti proudu [11]

Proudový rozsah [A]	Průměr plynové dýzy [mm]
< 70	6 – 9
70 – 150	9 – 11
150 – 250	11 – 13
250 – 300	13 – 15
300 – 500	15 - 18

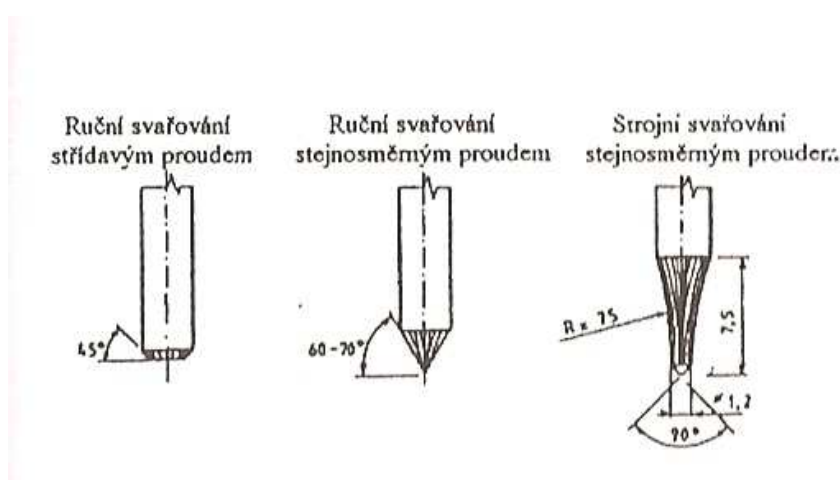
Hořáky určené pro metodu TIG musí splňovat:

- Dokonalé chlazení svařovacího vodiče, hořáku a wolframové elektrody
- Nastartování elektrického oblouku okamžité
- Snadná výměna wolframové elektrody a keramické hubice
- Dokonalá těsnost všech přívodů ochranného plynu či chladicí kapaliny

V praxi se používají hořáky následujících typů ZIS 114, ZHT 160, SR 26 ABW 10 atd. [11].

### 3.4 Netavící se elektrody

U metody TIG se používají netavící se elektrody v podobě tyčky s kruhovým průřezem. Tyto tyčky jsou vyrobeny z čistého wolframu nebo wolframu s příměsí oxidů  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{LaO}_2$  a  $\text{CeO}_2$ . Použití wolframu je zvoleno díky jeho vysoké teplotě tavení ( $3400^\circ\text{C}$ ) a velké emisní schopnosti. Volba typu elektrody závisí na druhu proudu, oblasti použití a kvalitě svaru. Elektrody jsou dodávány v průměrech: 0,5, 1,0, 1,6, 2, 2,5, 3,2, 4, 5, 6,3, 8 a 10 mm v délkách 50, 75, 150, 175 mm. Konce elektrod se upravují buď broušením, nebo se pro zvláštní případy leptají. Zakončení elektrod se volí dle druhu proudu a způsobu svařování (Obr. 16)



Obr. 16 Zakončení elektrod [11]

Jestliže jsou elektrody broušeny, musí být jejich povrch čistý, kovově lesklý, bez rýh a otřepů. Označení chemické složení a barevné značení je v tabulce 8. Wolframové elektrody jsou normované dle ČSN EN 26848. Jestliže použijeme běžný typ hořáku je možné pro jednotlivé průměry wolframových elektrod doporučit rozsah svařovacího proudu [11].

Tabulka 8 Chemické složení, barevné značení a označení wolframových elektrod [11]

Označení	Druh oxidu	Množství přísady v [ % ]	Barevné značení
WP	-	-	Zelená
WT 4	$\text{ThO}_2$	0,35 – 0,55	Modrá
WT 10	$\text{ThO}_2$	0,80 – 1,20	Žlutá
WT 20	$\text{ThO}_2$	1,70 – 2,20	Červená
WT 30	$\text{ThO}_2$	2,80 – 3,20	Fialová
WT 40	$\text{ThO}_2$	3,80 – 4,20	Oranžová
WZ 3	$\text{ZrO}_2$	0,15 – 0,50	Hnědá
WZ 8	$\text{ZrO}_2$	0,70 – 0,90	Bílá
WL 10	$\text{LaO}_2$	0,90 – 1,20	Černá
WC 20	$\text{CeO}_2$	1,80 – 2,20	Šedá

## **Experimentální část**

## 4 Metodika experimentálních prací

Experimentální část bakalářské práce byla provedena v laboratořích katedry mechanické technologie.

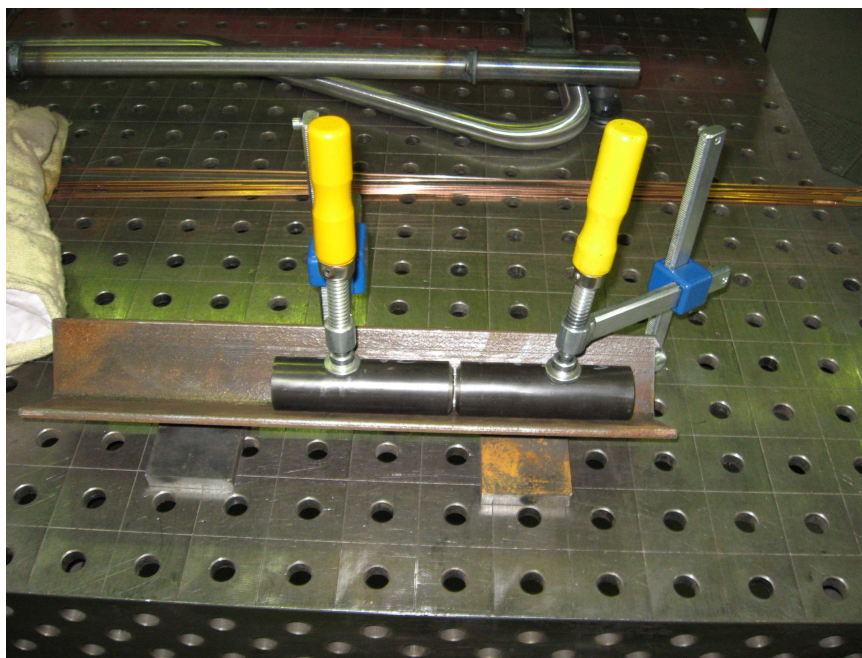
Svarové spoje byly provedeny na čtyřech trubkách o průměru 38 mm a tloušťce stěny 6,3 mm oceli T24 metodou TIG, přídavný materiál byl Union I CrMoVTiB Ø 2,4 mm. Obal přídavného materiálu je na obrázku 17. Svařovací zdroj byl použit od firmy Fronius (Obr. 18). V první části svařování byly trubky sestehovány na přípravném stole (Obr. 19). Poté byly trubky vloženy do přípravku pro obvodové svařování v poloze PA (Obr. 20). Jakmile byla trubka upnuta, bylo vykonáno zavaření kořene (Obr. 21). Před provedením další housenky bylo nutno dodržet časovou prodlevu z důvodu poklesu mezihousenkové teploty na předepsanou hodnotu. Po kontrole mezihousenkové teploty měřicím přístrojem bylo možno provést první housenku (Obr. 22). Mezi první a druhou housenkou bylo nutné opět dodržet prodlevu. Na obrázku 23 je znázorněna konečná podoba svaru.



Obr. 17 Obal přídavného materiálu

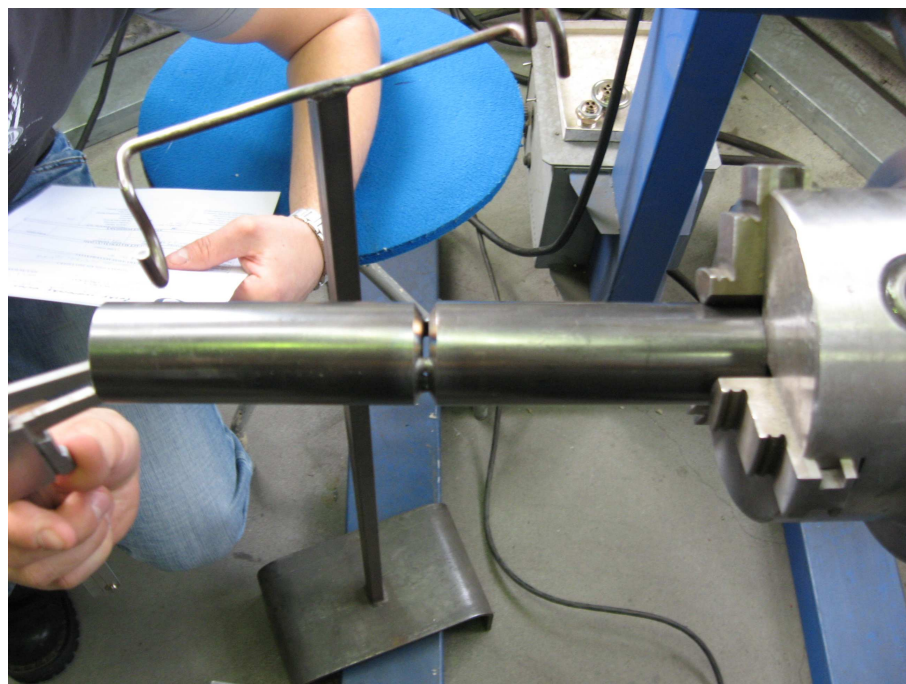


*Obr. 18 Svařovací zdroj Fronius Kühigerat FK 2500, IEC 60 974 – 2/ - 10 CIA*

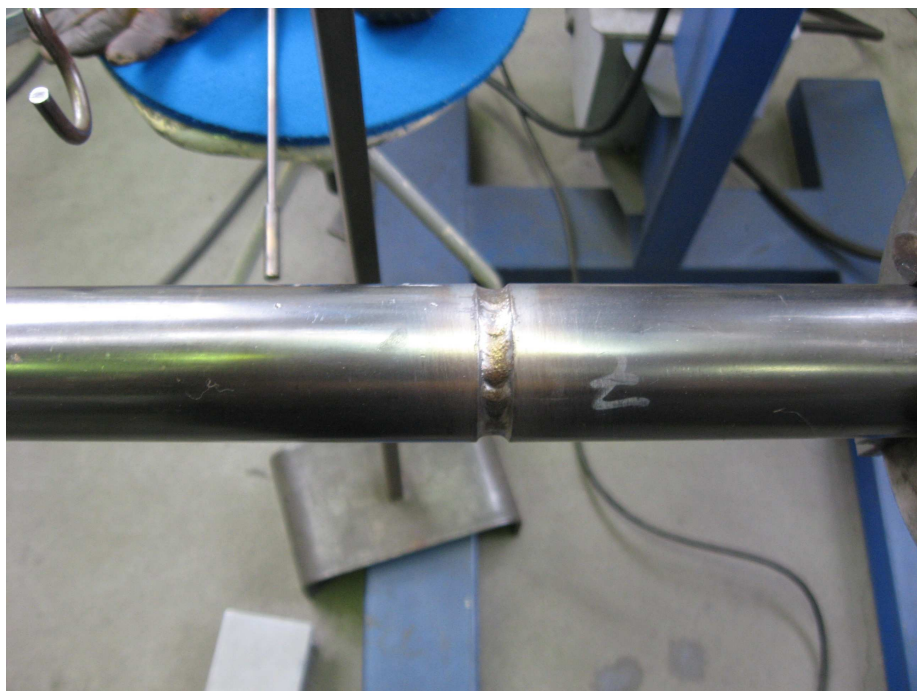


*Obr. 19 Příprava pro stehování*

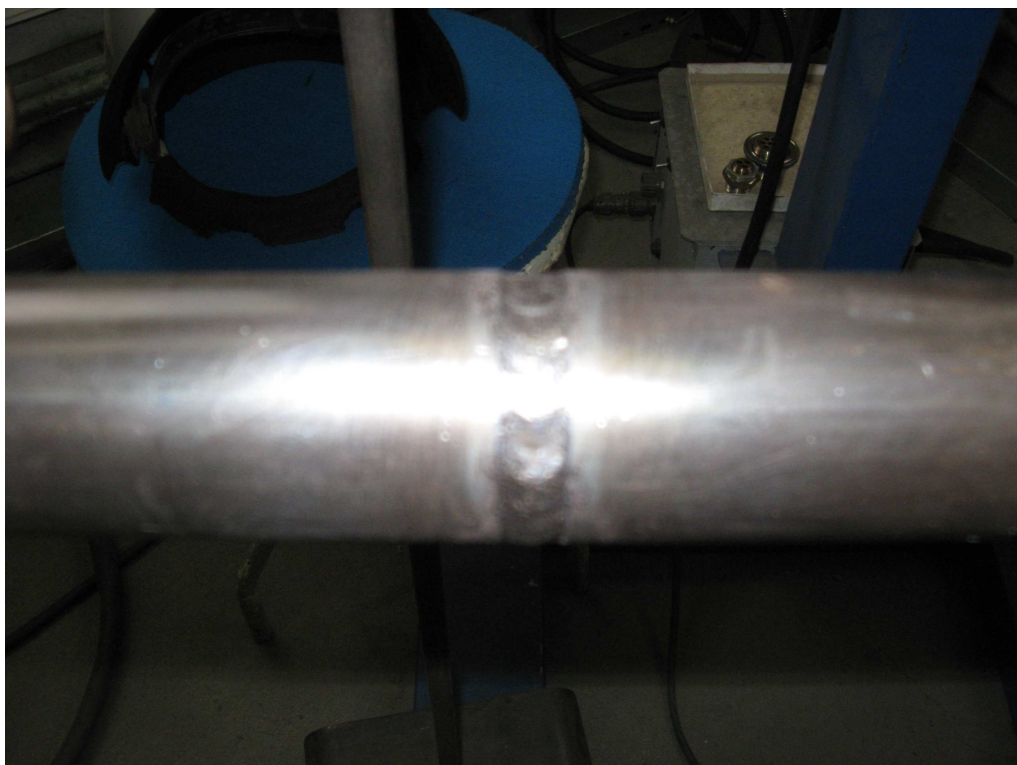




*Obr. 20 Upevnění v přípravku pro polohu PA*



*Obr. 21 Zavařený kořen*



*Obr. 22 Po provedení 1 housenky*



*Obr. 23 Konečná podoba svaru*

Po svaření bylo provedeno na dvou vzorcích tepelné zpracování v podobě popouštění. Popouštění bylo provedeno v peci při teplotě 760 °C a výdrži 2 hodiny.

Po provedení tepelného zpracování byly všechny čtyři svařence rozřezány mechanicky na pile. Každý svařený kus byl rozřezán na 5 vzorků. Z těchto vzorů byly vybrány dva vzorky pro provedení zkoušek. Jeden vzorek byl bez tepelného zpracování s označením 3.5. Druhý vzorek byl s tepelným zpracováním s označením 2.5. Po vybrání vzorků následovala příprava pro metalografii. Výbrusy byly zhotoveny ručně. Po provedení metalografie byly vzorky podrobeny zkoušce tvrdosti. Po těchto zkouškách byly vzorky vyjmuty ze zalivací hmoty, jelikož budou tyto vzorky dále podrobeny simulovanému provozu.

### 4.1 Návrh technologického postupu pro trubičky z materiálu T24

Jako základní materiál byla použita ocel 7CrMoVTiB 10-10 ( T24 ) v podobě trubky o průměru 38 mm a tloušťce stěny 6,3 mm určena pro výrobu membránových stěn, číslo materiálu EN 1.7378. Byla použita metoda svařování TIG (141). Touto metodou byl svařen kořen a dvě housenky. Byla navržena elektroda WT 20, barevné označení: červeně. Přídavný materiál byl použit v podobě drátu o průměru 2,4 a délce 1000 mm. Označení přídavného materiálu Union I CrMoVTiB. Výrobce přídavného materiálu je známá firma Böhler-Thyssen, označení přídavného materiálu dle výrobce je EN 12070 – WZ CrMoV 2 1 TiB, AWS A5.28 – 96: ER 90S – G. Jako ochranný plyn byl zvolen argon UN 1006. Chemické složení základního materiálu je v tabulce 9.

*Tabulka 9 Chemické složení základního materiálu dle předpisu*

Prvek	%
C	0,05 – 0,10
Si	0,15 – 0,45
Mn	0,30 – 0,70
P	max. 0,020
S	max. 0,010
Cr	2,20 – 2,60
Mo	0,90 – 1,10
Ti	0,05 – 0,10
V	0,20 – 0,30
Al	max. 0,020
N	max. 0,012
B	0,0015 – 0,0070



Mechanické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10.

*Tabulka 10 Mechanické hodnoty oceli T24 dle předpisu*

Rm [MPa]	585 - 840
Re [MPa]	450
A [%]	20%
Rp 0,2 [MPa]	min 450

Chemické složení přídavného materiálu je v tabulce 11.

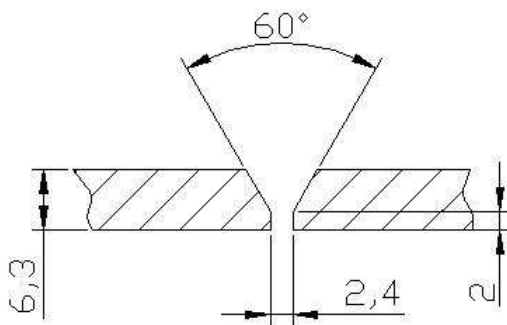
*Tabulka 11 Chemické složení přídavného materiálu*

Prvek	C	Mn	Mo	Si	Cr	V	Ti	B
%	0.05	0.50	1.0	0.30	2.20	0.22	0.05	0.003

Parametry pro svařování kořene byly navrženy: napětí  $U = 31\text{--}33\text{ V}$ , proud  $I = 500\text{--}600\text{ A}$  a rychlost svařování  $v = 0,02\text{--}0,04\text{ m/min}$ . Hodnoty pro 1 a 2 housenku byly zvoleny a to: napětí  $U=31\text{--}33\text{ V}$ , proud  $I=500\text{--}600\text{ A}$  a rychlost svařování  $v = 0,03\text{--}0,05\text{ m/min}$ .

#### Úprava svarových ploch:

Úprava byla provedeny na soustruhu. Úprava je v souladu s normou.



*Obr. 24. Úprava svarových ploch pro T24*

### **Ověření svařitelnosti zvoleného základního materiálu**

Vlastnosti základního materiálu, příklady použití: Svařitelnost zaručená. Výparníková oblast, membránové stěny.

Výpočet ekvivalentního uhlíku:

Pro výpočet byly použity střední hodnoty hmotnostních podílů.

Dle Ita a Bessya :

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$P_{cm} = 0,07 + \frac{0,3}{30} + \frac{0,5}{20} + \frac{2,4}{20} + \frac{1}{15} + \frac{0,25}{10} + 5 * 0,004$$

$$P_{cm} = \underline{0,337 \%}$$

Dle CR ISO 15608 norma ČSN EN 1011 – 2 :

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CET = 0,07 + \frac{0,5 + 1}{10} + \frac{2,4 + 0}{20} + 0$$

$$CET = \underline{0,34 \%}$$

Ověření svařitelnosti základního materiálu na tvorbu studených trhlin:

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{k}{400000}$$

$$P_w = 0,337 + \frac{5}{60} + \frac{437,7}{400000}$$

$$P_w = 0,421\%$$

H=obsah difuzního vodíku

$$k = k_0 * t = 69 * 6,3 = 437,7 \text{ N/mm}^2$$

H= 5 (mlH/100g)

$k_0$ =koeficient pro tupý spoj→ $k_0=69$

→volím **H= 5 ml/100g**

k=intenzita tuhosti spoje (N/mm<sup>2</sup>)

t = tloušťka plechu (mm)

Kritérium praskavosti:

$$P_w \leq 0,3$$

$$0,421 \geq 0,3$$

Dle tohoto výsledku je ocel T24 náchylná na tvorbu studených trhlin

Ověření svažitelnosti základního materiálu na tvorbu horkých trhlin:

$$[H.C.S] = \frac{C \cdot \left[ S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right]}{3Mn + Cr + Mo + V} \cdot 10^3$$
$$[H.C.S] = \frac{0,07 \cdot \left[ 0,009 + 0,015 + \frac{0,3}{25} \right]}{3 \cdot 0,5 + 2,4 + 1 + 0,25} \cdot 10^3$$
$$[H.C.S] = 0,4893$$

Kritérium praskavosti:

$$1,6 > [H.C.S.]$$

$$1,6 < 0,4893$$

Dle porovnání výsledku ocel T24 není náchylná na tvorbu horkých trhlin

### **Technologický postup:**

<b>Čísł. oper.</b>	<b>Popis činnosti</b>	<b>Parametry</b>
	<b>Příprava</b>	
	<b>TR1, TR2, TR3, TR4</b>	
<b>1.</b>	Úprava svarových ploch, úkos 4x30°	Soustruh
1.1.	Očistit, odmastit svarové plochy	Kartáč, odmašťovadlo
1.2.	Předehřev	T = 100 °C
1.3.	Kontrola teploty	OMEGA HH 11
	<b>TR 1 a TR 2</b>	
<b>2.</b>	<b>Svar č. 1 a 2</b>	
2.1.	Stehovat v přípravku, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 10 - 12V [=(-)] I=85 - 90 A Plyn :Argon UN 1006
2.2.	Upevnit sestehovaný kus do přípravku na svařování obvodového svaru v poloze PA	
2.3	Předehřev	T = 100 °C
2.4.	Zavařit kořen, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 10 - 12V [=(-)] I=100 - 105 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,03 m/min
2.4.	Kontrola mezihousenkové teploty	Interpass : max 200°C OMEGA HH 11
2.5.	Zavařit obvodový svar, 1 housenka, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 12 - 14V [=(-)] I=124 - 126 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,045 m/min

2.6.	Kontrola mezihousenkové teploty	Interpass : max 200°C OMEGA HH 11
2.7.	Zavařit obvodový svar, 2 housenka, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 12 - 14V [=(-)] I=124 - 126 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,045 m/min
2.8.	Dohřev	T=250°C /2,5 hod
2.9.	Popouštění	v <sub>ohř</sub> = 80 °C/ hod T=760°C Výdrž 2 hod Ochlazovat na vzduchu
	<b>TR 3 a TR 4</b>	
	<b>Svar č. 3 a 4</b>	
3.1.	Předehřev	T = 100 °C
3.2.	Kontrola teploty	OMEGA HH 11
3.3.	Stehovat v přípravku, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 10 - 12V [=(-)] I=85 - 90 A Plyn :Argon UN 1006
3.4.	Upevnit sestehovaný kus do přípravku na svařování obvodového svaru v poloze PA	
3.5.	Předehřev	T = 100 °C
3.6.	Zavařit kořen, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 10 - 12V [=(-)] I=100 - 105 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,03 m/min
3.7.	Kontrola mezihousenkové teploty	Interpass : max 200°C OMEGA HH 11

3.8.	Zavařit obvodový svar, 1 housenka, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 12 - 14V [=(-)] I=124 - 126 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,045 m/min
3.9.	Kontrola mezihousenkové teploty	Interpass : max 200°C OMEGA HH 11
3.10.	Zavařit obvodový svar, 2 housenka, metoda 141 TIG	Příd. mat: Union I CrMoVTIB Ø 2,4 U= 12 - 14V [=(-)] I=124 - 126 A Plyn :Argon UN 1006 v = 0,045 m/min
3.11.	Dohřev	T=250°C /2,5 hod

Záznam technologie svařování oceli T24 viz. Příloha P I.

## 5 Tepelné zpracování svarových spojů oceli T24

### 5.1 Určení teploty předehřevu:

#### Výpočet teploty předehřevu dle ČSN EN 1011-2 – metoda B:

Tato metoda se používá pro eliminaci vodíkového praskání ocelí skupin 1 až 4. Tyto oceli musí splňovat podmínky pro výpočet ekvivalentního uhlíku CET. Teplota předehřevu se stanovuje výpočtem, který zahrnuje[7]:

#### Vliv chemického složení oceli

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{pCET} = 750 \cdot 0,34 - 150$$

$$T_{pCET} = 105^{\circ}\text{C}$$

#### Vliv tloušťky svařovaných materiálů d [mm]

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{6,3}{35}\right) - 110$$

$$T_{pd} = -81,52^{\circ}\text{C}$$

#### Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu v [ml/100g]

Dle ČSN EN ISO 3690

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{pHD} = 62 \cdot 5^{0,35} - 100$$

$$T_{pHD} = 9^{\circ}\text{C}$$

#### Vliv tepelného příkonu Q:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{pQ} = (53 \cdot 0,34 - 32) \cdot 1,56 - 53 \cdot 0,34 + 32$$

$$T_{pQ} = -7,83^{\circ}\text{C}$$

**Teplota předehřevu se vypočte jako součet jednotlivých příspěvků:**

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$$

$$T_p = 105 - 81,52 + 9 - 7,83$$

$$T_p = 24,65 \rightarrow 25^\circ\text{C}$$

Dle literatury [9] však byla zvolena teplota předehřevu 100 °C

## **5.2 Dohřev**

Toto tepelné ovlivnění se také označuje jako žíhání na snížení obsahu difuzního vodíku. Jedná se o nízkoteplotní žíhání svarových spojů, které slouží ke snížení obsahu difuzního vodíku ve svarovém spoji po svařování. Hlavní funkcí dohřevu je snížení rizika vzniku studených trhlin. Teplota dohřevu se volí v rozmezí teplot 200°C až 300°C. Doba výdrže se určuje dle tloušťky svařence, nejméně však 2 hodiny.

Teplotu dohřevu volím 250°C při výdrži 2,5 hodiny dle literatury [7]

## **5.3 Popouštění**

Popouštění jako tepelné zpracování po svařování materiálu T/P24 je diskutovaným tématem, jak je již zmíněno v předchozích kapitolách. Proto popouštění bylo použito jen na jednom vzorku. Druhý vzorek byl ponechán bez tepelného zpracování. Teplota popouštění byla zvolena dle literatury [9].

Teplota popouštění: 750 – 760 °C

Výdrž na popouštěcí teplotě 2 hodiny a následné ochlazování na vzduchu. Rychlost ohřevu na popouštěcí teplotu byla 80 °C za hodinu dle literatury [9].

Průběh tepelného zpracování je znázorněn v grafu 1.





*Graf 1 Znázorňuje časový průběh tepelného zpracování vzorku 2.5.*

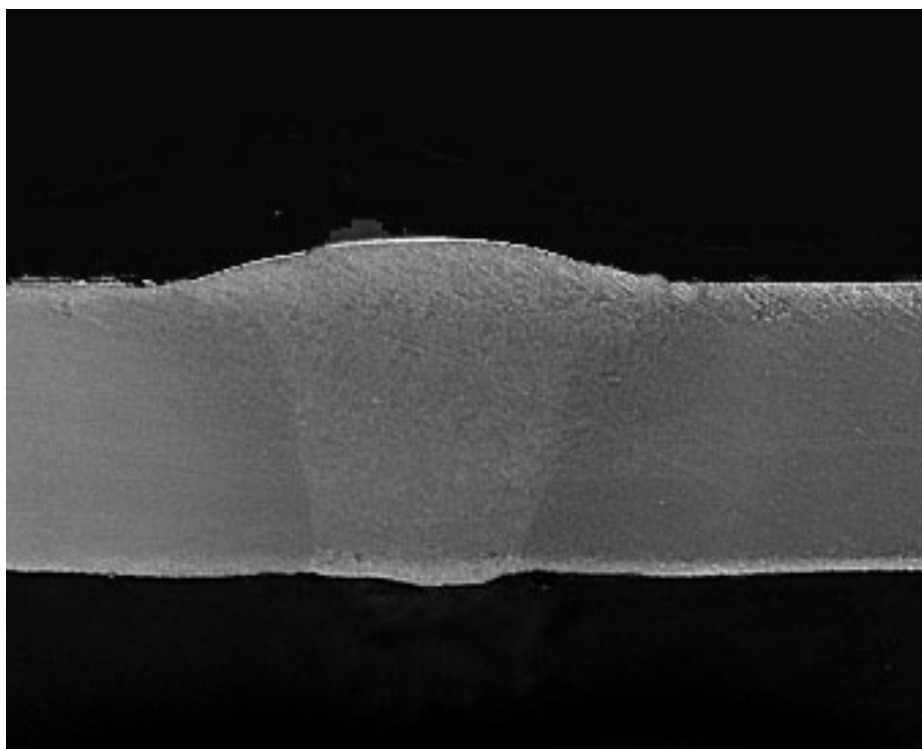
## 6 Metalografie svarového spoje oceli T24

### 6.1 Odběr vzorků

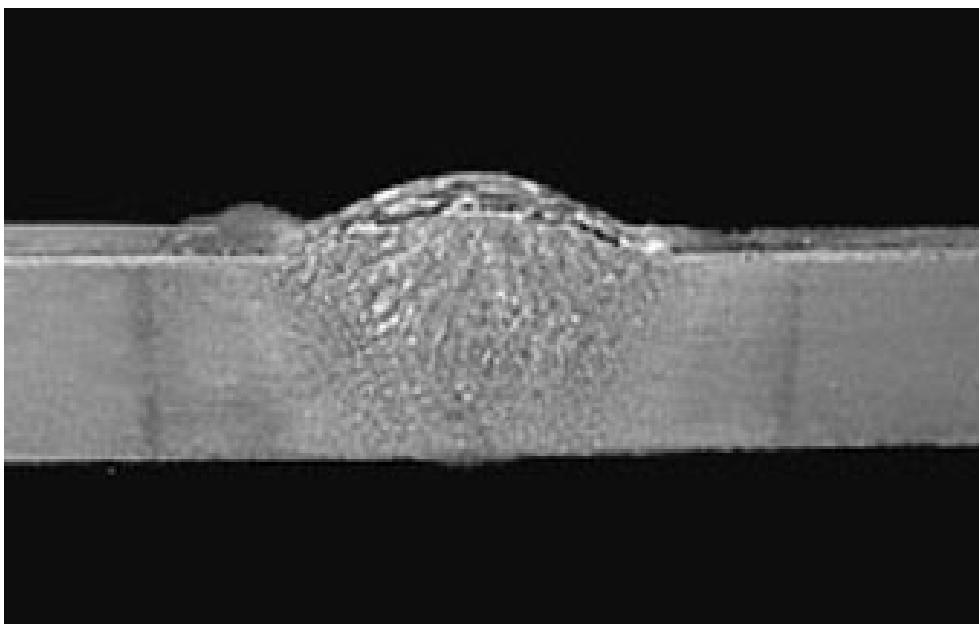
Vzorky k metalografické zkoušce byly získány mechanickým dělením na pile. Jeden vzorek byl vybrán ze vzorků s tepelným zpracováním. Druhý vzorek byl vybrán ze vzorků bez tepelného zpracování. Označení vzorku z trubky tepelně zpracované bylo 2.5 a označení vzorku z trubky tepelně nezpracované bylo 3.5.

### 6.2 Příprava vzorků

Jako první byly vzorky zality do dentacrylu. Po vytvrdnutí dentacrylu byly provedeny výbrusy na vodě-odolných smircích o zrnitosti 80, 180, 280, 400. Před přechodem na následující smírek bylo nutné řádně opláchnout, z důvodu zabránění přenosu hrubšího zrna na jemnější smírek. Jakmile byly vzorky vybroušeny bylo nutné je opět opláchnout pod vodou a lihem a vysušit fénem a to proto, aby nedošlo k okamžité korozi vybroušené plochy. Vzorky byly naleptány činidlem dle Adlera.



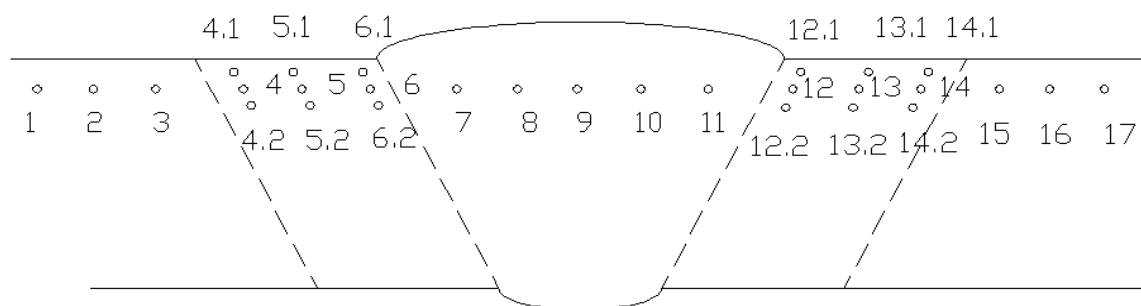
*Obr. 25 Makrostruktura vzorku 2.5 (TZ: 760°C/2h), 5x*



*Obr. 26 Makrostruktura vzorku 3.5 (bez TZ), 3x*

## 7 Měření tvrdosti svarového spoje T24

Měření tvrdosti probíhalo na vzorcích použitých pro metalografii, což byla příprava pro měření tvrdosti. Měření tvrdosti bylo provedeno dle normy ČSN EN 1043 – 1. Umístění jednotlivých vpichů je znázorněno na obr.21. Vpichy byly vedeny v linii 2 mm od horního okraje. Vzdálenost vpichů byla dodržena dle normy ČSN EN 1043 – 1.



Obr. 27 Umístění jednotlivých vtisku u svarového spoje oceli T24

Tabulka 12: Hodnoty HV 10 pro vzorek 3.5 bez TZ

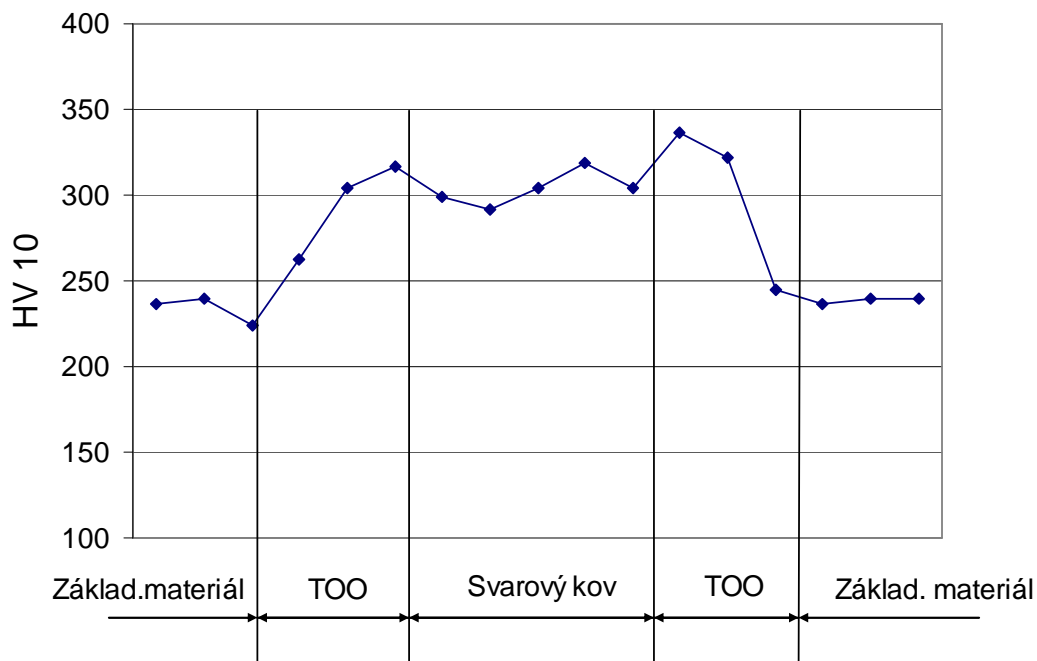
Č. vpichu	Hodnoty HV 10	Oblast	Č. vpichu	Hodnoty HV 10	Oblast
1	236	ZM	10	319	SK
2	240		11	304	
3	224		12	336	TOO
4	243	TOO	12.1	336	
4.1	254		12.2	336	
4.2	254		13	330	
5	289		13.1	333	
5.1	317		13.2	333	
5.2	287		14	251	
6	309		14.1	230	
6.1	322		14.2	254	
6.2	322		15	236	ZM
7	299	SK	16	240	
8	292		17	240	
9	304				

Tabulka 13: Hodnoty HV 10 pro vzorek 2.5 (TZ: 760°C/2h)

Č. vpichu	Hodnoty HV 10	Oblast	Č. vpichu	Hodnoty HV 10	Oblast
1	206	ZM	10	221	SK
2	197		11	242	
3	206		12	228	TOO
4	210	TOO	12.1	221	
4.1	218		12.2	228	
4.2	206		13	222	
5	206		13.1	221	
5.1	216		13.2	221	
5.2	221		14	206	
6	219		14.1	213	
6.1	216	SK	14.2	206	
6.2	221		15	206	ZM
7	225		16	206	
8	219		17	197	
9	206				

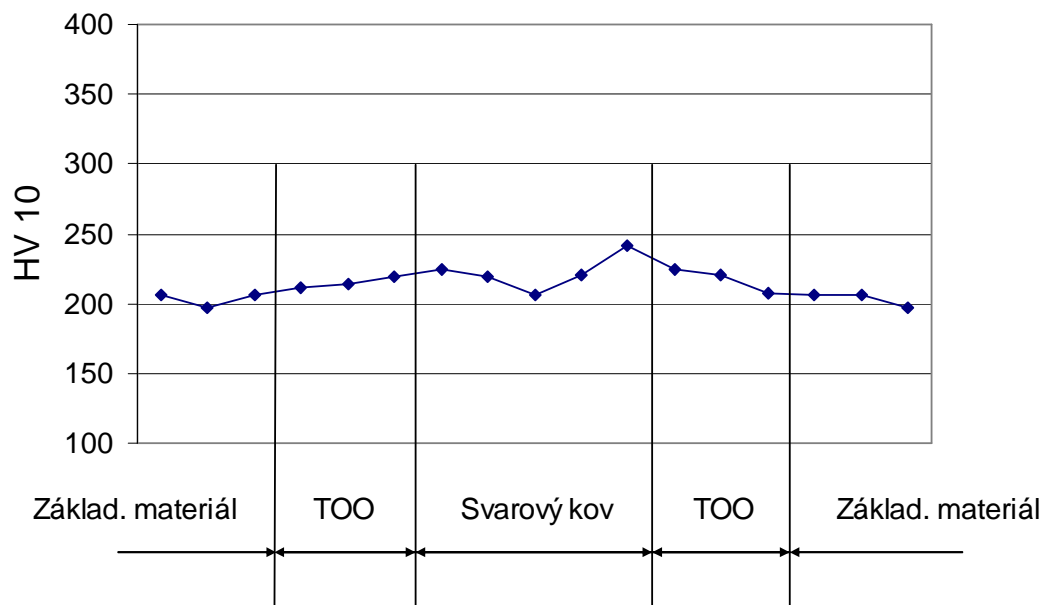
Průběh tvrdosti u vzorku 3.5 je vyobrazen v grafu 2, graf 3 představuje průběh tvrdosti u vzorku 2.5 (TZ: 760°C/2h).

Průběh tvrdosti u vzorku 3.5 bez TZ



Graf 2: Průběh tvrdosti u vzorku 3.5 bez TZ

Průběh tvrdosti u vzorku 2.5 s TZ (760°C/2h)



Graf 3: Průběh tvrdosti u vzorku 2.5 s TZ

## 8 Diskuze výsledků

Dva vzorky, které byly podrobeny zkoušce metalografické a zkoušce tvrdosti byly odebrány ze dvou svarových spojů oceli 7CrMoVTiB10 – 10 (T24) a přídatného materiálu Union I CrMoVTiB. Přičemž jeden svarový spoj byl tepelně zpracován a to konkrétně popouštěním při teplotě 760 °C a výdrži 2 hodiny, druhý spoj byl ponechán bez tepelného zpracování.

Z hlediska metalografie je viditelný rozdíl mezi oběma vzorky. Na první pohled je patrné, že vzorek 3.5 bez tepelného zpracování má širokou tepelně ovlivněnou oblast. Struktura tohoto spoje vykazuje velké rozdíly ve struktuře. Jestliže se zaměříme na vzorek 2.5 tepelně zpracovaný, můžeme pozorovat homogennější strukturu jak v tepelně ovlivněné oblasti tak i ve svarovém kovu. Struktury tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu jsou opticky dosti podobné základnímu materiálu. Oba vzorky nevykazují zjevné vady. Struktury nezpracovaného vzorku lze považovat za náchylnější ke vzniku různých vad, zejména sekundárnímu vytvrzení a následné ztrátě plasticity.

Při pohledu na průběh tvrdosti u vzorku 3.5 v grafu 2 můžeme zaznamenat výrazné rozdíly mezi hodnotami pro základní materiál a tepelně ovlivněnou oblast. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou činí téměř sto jednotek pro HV 10. Co se týče svarového kovu i ten vykazuje výrazný rozdíl hodnot oproti základnímu materiálu. Tyto rozdíly vyjadřují již zmíněnou odlišnost struktur u nezpracovaného vzorku. Nejvyšší hodnota tvrdosti pro HV 10 je 336, tato hodnota nepřesahuje povolenou hodnotu tvrdosti pro žárupevné materiály. Naopak průběh tvrdosti u zpracovaného vzorku 2.5 v grafu 3 je výrazně rovnoměrnější. Toto je způsobeno použitím popouštění, které homogenizuje strukturu, snižuje tvrdost a zvyšuje houževnatost, brání sekundárnímu vytvrzení.

Po provedení simulovaného provozu budou vzorky podrobeny navíc zkoušce vrubové houževnatosti. Z výsledků tvrdosti lze předpokládat, že u vzorků bez tepelného zpracování bude zvýšená tvrdost, což souvisí s poklesem vrubové houževnatosti. Díky tomu se můžeme domnívat s velmi podobnými výsledky uvedenými v práci [9].

Lze tedy konstatovat, že tepelné zpracování má zásadní vliv na svarové spoje moderní žárupevné oceli 7CrMoVTiB10 – 10 (T24). Tepelné zpracování ovlivňuje jak strukturní homogenitu, tak rozdíly v hodnotách tvrdosti a v neposlední řadě snižuje možnost vzniku sekundárního vytvrzení. Pro ověření existence sekundárního vytvrzení bude potřeba provést simulaci provozu při pracovní teplotě.

## **9 Závěr**

Cílem bakalářské práce bylo určit vliv tepelného zpracování na svarový spoj moderní žárupevné oceli 7CrMoVTiB10 – 10 (T24).

V teoretické části jsou popsány dosavadní zkušenosti s problematikou tepelného zpracování. Je k zamyšlení, že výrobci této moderní oceli se rozcházejí s názorem na tepelné zpracování svarových spojů s jinými odborníky zabývajícími se touto problematikou. Jedním z důvodů nezařazení tepelného zpracování se uvádí vyhovující tvrdost po svaření. Ovšem u svarových spojů bez tepelného svařování dochází k tzv. sekundárnímu vytvrzení. Tento jev může být nebezpečný například při odstávce zařízení, kdy může dojít k úplnému porušení svarového spoje a následné havárii zařízení.

Experimentální část obsahuje technologický postup svařování 7CrMoVTiB10 – 10 přídavným materiálem Union I CrMoVTiB. Provedené zkoušky poukazují na jednoznačné rozdíly mezi svarovým spojem bez tepelného zpracování a svarovým spojem, na kterém bylo provedeno tepelné zpracování v podobě popouštění.

Proto lze vyslovit závěr, že tepelné zpracování svarového spoje oceli 7CrMoVTiB10 – 10 by mělo být nedílnou součástí technologického postupu při svařování této moderní žárupevné oceli.



## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. P. Mohylovi z katedry mechanické technologie VŠB – TU Ostrava za příkladné vedení bakalářské práce. Dále chci poděkovat paní Ing. X. Ševčíkové, Ing. J. Čapkové za metodickou pomoc při metalografické zkoušce. Paní Ing. L. Krejčí za metodickou pomoc při zkoušce tvrdosti.

## Použitá literatura

- [1] Pecha, Josef., Peleš, Ondrej., Hakl, Ján., Vlasák, Tomáš. Skúsenosti so zváraním ocele P23. In *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování. Sborník přednášek 19.09. – 21.09.2007*. Ostrava: VŠB – TU. Český svářečský ústav s.r.o., 2007. s. 125 – 137, ISBN 978-80-248-1573-2
- [2] HRACHOVINA, Petr. Trubkové oceli T/P23 a 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) pro moderní elektrárny s vysokým výkonem – svařování těchto ocelí a provedení různorodých spojů nových ocelí. In *Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování. Sborník přednášek 19.09. – 21.09.2007*. Ostrava: VŠB – TU. Český svářečský ústav s.r.o., 2007. s. 89 – 106, ISBN 978-80-248-1573-2
- [3] The T23/T24 Book. Vallourec & Mannesman tubes. 2002
- [4] Přídavné materiály pro stavbu elektráren
- [5] Hrivňák, I. *Teoria zvaratelnosti kovov a zliatin*, Veda, 1989, Bratislava
- [6] MOHYLA, P., KOUKAL, J. Nové výsledky zkoušek svažitelnosti oceli T24. In *Sborník konference TechMat 06 : 2.11.2006*, Svitavy. Pardubice : TU Pardubice, 2006, s. 17-21. ISBN 80-7194-902-7.
- [7] Koukal, J., Zmydlený, T. *Svařování I*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2005, ISBN 80 – 248 – 0870 – 6
- [8] PURMENSKÝ, J., FOLDYNA, V. Strukturní stabilita CrMoV nízkolegovaných žáropevných ocelí. sborník Materiálové vady ocelových výrobků, Mar. Lázně, říjen-listopad, 1973
- [9] MOHYLA, P., KOUKAL, J. Perspektivní žáropevné oceli a jejich svažitelnost. In *Sborník konference XXVII. Dny svařovací techniky : 24.-26.5.2005, Vamberk*. Pardubice : Dům techniky Pardubice, spol. s r.o., 2005,s. 69-74. ISBN 80-02-01726-9.
- [10] HEUSER, H., JOCHUM, C. Characterization of Matching Filler Metals for New Ferritic/Bainitic Steels like T/P23 and T/P24. In: *Proceedings of COST Programme part III: Materials for Advanced Power Engineering 2002*, Vol. 21
- [11] Ing. Balej, Z., Ing. Kudělka, V., Opletal, J. *Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu metodou 141 (TIG)*, Zeross, 2004, ISBN 80–85771
- [12] Minařík, Václav. Obloukové svařování, Scientia spol s.r.o., 2003, Praha, ISBN 80 – 7183 – 285 – 5
- [13] MOHYLA, P., KOUKAL, J. Svažitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení. All for Power, č. 3/2008, roč. 2. Konstrukce Media, s.r.o. str. 60-63, ISSN 1802-8535
- [14] ČSN EN 1043 – 1, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním* , Praha: Český normalizační institut, leden 1997

## **Seznam příloh**

**Příloha P I:** ..... Chyba! Záložka není definována.